El momento de la creación

Del Big Bang hasta el Universo actual

James S. Trefil

Biblioteca
Científica
Salvat

El momento de la creación

Del Big Bang hasta el Universo actual

James S. Trefil

SALVAT

Versión española de la obra original norteamericana *The moment of creation*, publicada por Charles Scribner's Sons de Nueva York

Traducción: Robert Estalella
Diseño de cubierta: Ferran Cartes / Montse Plass

Escaneado: thedoctorwho1967.blogspot.com
Edición digital: Sargont (2018)

ISBN: 84-345-8880-3 (Obra completa)
ISBN: 84-345-8921-4 (Volumen 41)
Depósito Legal: B-5104-1994
Publicada por Salvat Editores, S.A., Barcelona
Impresa por Printer, i.g.s.a., Abril 1994
Printed in Spain

INDICE

INTRODUCCIÓN

PRIMERA PARTE
I. EL BIG BANG
II. LAS EDADES DEL UNIVERSO
III. LOS PROBLEMAS DE LA TEORÍA DEL BIG BANG

SEGUNDA PARTE
IV. PARTÍCULAS ELEMENTALES Y QUARKS
V. LAS FUERZAS FUNDAMENTALES
VI. LA PRIMERA UNIFICACIÓN MODERNA
VII. LA GRAN UNIFICACIÓN
VIII. LA DESINTEGRACIÓN DEL PROTÓN

TERCERA PARTE
IX. EL MOMENTO DE LA CREACIÓN
X. INFLACIÓN
XI. RESOLVIENDO LOS PROBLEMAS DEL BIG BANG
XII. LA BÚSQUEDA DE LAS PARTÍCULAS FÓSILES
XIII. MÁS ALLÁ DEL TIEMPO DE PLANCK:
PLANTEANDO LAS PREGUNTAS FINALES
XVI. EL DESTINO DEL UNIVERSO

EPÍLOGO

GLOSARIO

Este libro está dedicado a:

Wallar Meuhl, J. Sterling Morton High School
Robert Hulsizer, University of Illinois
Rom Harré, Oxford University
Sidney Drell, Stanford University

que se esforzaron por enseñarme parte de lo que sabían.

INTRODUCCIÓN

"¿De dónde venimos?" Pocas preguntas atenazan con más fuerza la mente que las relacionadas con la creación del Universo. Todas las sociedades han reservado un lugar importante en su folklore a la explicación de cómo empezó a existir el mundo. Estas historias épicas de la creación trataban originalmente de las hazañas de los dioses, cuyos caprichos, batallas o necesidades motivaban la creación del mundo y de sus habitantes humanos. Pero, ya en tiempos tan remotos como el siglo VI a. C, los filósofos de las colonias griegas del Mediterráneo oriental trataban de explicar las interacciones entre los elementos tierra, fuego, aire y agua que habían dado lugar al Cosmos tal como lo conocemos. Con esos filósofos, el énfasis en la búsqueda de la comprensión del Universo cambió del "quien" al "como".

La contribución de la civilización occidental a esta empresa humana de tan largo alcance es impresionante y, tal como veremos a continuación, lo ha sido mucho más en estos últimos años. Desde principios del siglo XX, sabemos que existe una expansión general del Universo, y que las remotas galaxias se alejan de nuestra propia Vía Láctea. A medida que aumentaba nuestra capacidad para medir las propiedades de las regiones lejanas del Universo, surgía una imagen que constituye la historia épica de la creación relatada por el método científico. El peso de la evidencia acumulada nos indica que la expansión que presenciamos es el resultado de una explosión titánica que tuvo lugar hace unos 15.000 millones de años, una explosión a la que damos el nombre de Big Bang.

Una manera de medir el grado de plenitud de nuestro conocimiento de la historia del Universo es averiguar hasta dónde podemos seguir hacia atrás la evolución de la materia o, dicho de otro modo, lo cerca que podemos llegar del mo-

mento real de la creación en el Big Bang. En los primeros años de este siglo, conocíamos la ley de gravitación universal, por lo que podíamos discutir la formación de las galaxias (y de las estrellas dentro de las galaxias) como ejemplo de la acción de la gravedad al agrupar grandes masas. Esto significaba que podíamos llegar a unos 500.000 años del Big Bang. Hacia los años cuarenta, habíamos aprendido lo suficiente del núcleo atómico y de las partículas elementales más comunes para avanzar otro paso de gigante. Podíamos describir ahora el proceso de formación de los núcleos de hidrógeno y helio, la materia prima de las estrellas, a partir de protones y neutrones. Esto nos llevó a unos tres minutos del momento de la creación.

A mediados de los años sesenta, empezamos a comprender la estructura y el comportamiento de las partículas elementales —comprensión que se consiguió a través de un tremendo esfuerzo por parte de un gran número de físicos experimentales y teóricos—, lo que nos permitió seguir la evolución algo embrollada de las partículas que, por último, se condensaron en núcleos. Hacia 1970, habíamos empujado los límites del conocimiento hasta 1 milisegundo (10^{-3} segundos) aproximadamente del Big Bang.

Podría parecer que este nivel de conocimiento bastaría para satisfacer a todo el mundo, pero cuando los cosmólogos estaban aún en la tarea de ordenar los detalles del período posterior al milisegundo, los físicos teóricos ya sentaban las bases para el siguiente gran avance. Algunos problemas no resueltos en el campo de la física de las partículas estimularon la aparición de un nuevo tipo de teoría, una teoría que produjo una inmensa simplificación de nuestra imagen del aparentemente complejo mundo subatómico. Estas nuevas ideas, llamadas *teorías gauge*, se extendieron entre la comunidad de físicos, y determinaron una forma nueva por completo de contemplar los fenómenos naturales. Dado que estas teorías son de gran alcance, fue casi inevitable que se usaran para hacer retroceder aún más hacia el momento de la creación la frontera entre lo conocido y lo desconocido.

Durante los últimos años, el campo más excitante de la ciencia se ha situado en esa área donde se solapan la física de las altas energías y la astronomía. La frontera del conocimiento del Universo primitivo se ha hecho retroceder hasta algún lugar entre 10^{-35} y 10^{-43} segundos después del Big Bang, un intervalo tan breve que puede obligarnos a redefinir nuestro concepto del propio tiempo antes de seguir adelante. Esta síntesis ha sido tan afortunada que los teóricos se encuentran ahora empeñados en un intento para empujar la frontera hasta el momento mismo de la creación, y algunos de los investigadores más audaces van más lejos y formulan la pregunta última: ¿Por qué existe el Universo?

El momento de la creación cuenta la historia de esta enorme explosión de nuestro conocimiento del Universo primitivo. Después de una breve introducción histórica, que nos hace retroceder hasta el primer milisegundo, se explica la nueva física de las teorías gauge. Puesto que algunos de los conceptos de estas teorías pueden ser difíciles, hay una vía rápida para el lector que desee proseguir con la cosmología. Al final de cada capítulo de la segunda parte hay un sumario que proporciona los hechos esenciales de las teorías, sin entrar en su justificación. Una vez tengamos la nueva física a nuestra disposición, reanudaremos nuestra marcha hacia el momento de la creación hasta llegar a la frontera actual, punto en el que trataremos de adivinar lo que puede haber más allá.

En este libro hay muy pocas matemáticas, pero con frecuencia tengo que usar números muy grandes y muy pequeños para describir cantidades importantes. Para representarlos he utilizado la taquigrafía convencional de la llamada notación científica. En este sistema, todos los números se representan por un número entre 1 y 10 multiplicado por una potencia de 10. Si la potencia de 10 es positiva, la interpretamos como una instrucción para mover la coma decimal cierto número de lugares hacia la derecha. Por ejemplo, 2×10^2 sería 200, y 3×10^6 sería 3.000.000 (3 millones). Si la potencia de 10 es negativa, la interpretamos como una instrucción para mover la coma decimal hacia la izquierda. Así, 2×10^{-3} es 0,002 y 10^{-35} es un cero y una coma seguidos de treinta y

cuatro ceros y un 1. Esta notación nos evitará tener que cargar con un exceso de equipaje en forma de ceros.

Por último, me gustaría dar las gracias a una serie de personas que me ayudaron en este libro. Gloria Walters realizó las ilustraciones con un calendario muy apretado, y la ayuda de Nancy Lane fue, como siempre, inestimable en el proceso de montar el original. El número de colegas que contribuyó al libro con sus comentarios y conversaciones es tan grande que me es imposible nombrarlos a todos, pero quisiera agradecer en particular su ayuda a Paul Fishbane y a Robert Rood de la Universidad de Virginia, con la advertencia habitual de que soy el único responsable de cuantos errores pueda haber en el producto final.

JAMES TREFIL

PRIMERA PARTE

Desde el descubrimiento de la expansión del Universo en los años veinte, uno de los objetivos de la cosmología ha sido investigar la historia del Universo; de hecho, pasar la película hacia atrás hasta poder ver y comprender cómo empezó su existencia. Una medida de nuestro éxito en este empeño es la brevedad del tiempo que separa la frontera de nuestro conocimiento del momento de la creación. En los años veinte, este tiempo era de unos 3 minutos. Hasta hace pocos años, antes de los avances que son el tema principal de este libro, era de 1 milisegundo. En la actualidad, puede ser tan breve como 10^{-35} segundos.

En esta sección del libro se describe la historia de los descubrimientos referentes al Big Bang hasta el primer milisegundo, y se discuten algunos de los problemas que presentan las ideas convencionales del Big Bang. Veremos que, si esperamos solucionar estos problemas, deberemos reflexionar acerca de lo que sucedió en el Universo durante el primer milisegundo de su existencia.

I. EL BIG BANG

Una cosa acerca del pasado.
Es probable que dure.

OGDEN NASH

Tardamos varios miles de años en descubrir que la tierra sólida donde vivimos no es el centro del Universo, el núcleo inmóvil a cuyo alrededor giran los cielos. Pero, después que Copérnico y Kepler nos enseñaran que la Tierra se movía y que el Sol permanecía quieto, no tardamos mucho en advertir que las estrellas eran cuerpos muy parecidos al Sol. El hecho de que aparecieran fijas en el cielo se interpretó (de manera correcta) como una indicación de que estaban muy lejos del Sistema Solar. En 1750, sólo algo más de un siglo después que, en 1633, Galileo se viera obligado a retractarse de la doctrina copernicana en su juicio por herejía, el astrónomo inglés Thomas Wright sugirió la idea de que el aspecto de la Vía Láctea demostraba que las estrellas cercanas al Sistema Solar están dispuestas según una estructura discoidal plana. En la actualidad, llamamos a esta estructura galaxia de la Vía Láctea (*galácticos* en griego significa en realidad "lácteo"). Ésta es un conjunto de unos 10.000 millones de estrellas, de las que nuestro Sol es un miembro muy corriente. Sigue sin conocerse el número de sistemas planetarios que puede haber en ella.

Si el Sol forma parte de un conjunto de estrellas dispuestas en cierta forma, es natural preguntarse si existen en el Universo otros conjuntos parecidos. El debate sobre esta cuestión tuvo lugar a finales del siglo XVIII y durante el siglo XIX, y se centró en una serie de manchas débiles de luz existentes en el cielo, conocidas como nebulosas. Una de ellas, en la constelación de Andrómeda, era conocida por los astrónomos árabes y persas desde el siglo X. El famoso astrónomo

Sir William Herschel sugirió que algunas de estas nebulosas podrían ser galaxias como la Vía Láctea, como hizo también Immanuel Kant. Sin embargo, hay muchas nebulosas en el cielo que no son galaxias. Hay, por ejemplo, nubes de gas iluminadas por estrellas en su interior, que tienen el mismo aspecto que las galaxias. Estas nebulosas están claramente en nuestra propia galaxia, y se presentaron poderosos argumentos en contra de asignar distancias inmensas a cualquier otra nebulosa en el cielo. Uno de estos argumentos se centraba en el hecho de que en ocasiones se veían destellos de luz que se originaban en algunas nebulosas, destellos con un brillo tal, que ningún astrónomo del siglo XIX conocía una fuente de energía capaz de producirlos, a menos que la distancia hasta el origen del destello fuera relativamente pequeña. Hoy sabemos que esos destellos eran supernovas y que la fuente de energía es la conversión de inmensas cantidades de materia en energía. En el siglo XIX, sin embargo, no se concebían las supernovas y se desconocía la conversión de masa en energía, por lo que seguía sin respuesta la cuestión de si algunas nebulosas eran en realidad galaxias distantes o simplemente nubes dentro de la Vía Láctea.

Sólo en 1923, después de completarse el telescopio de 2,5 m del Mount Wilson Observatory, en las montañas de Los Ángeles, Edwin Hubble fue capaz de resolver este rompecabezas. Gracias a la potencia de este nuevo instrumento, fue posible estudiar estrellas individuales de la nebulosa de Andrómeda. Los tipos de estrellas observados por Hubble eran similares a los de nuestra propia galaxia; en particular, fue capaz de aislar varias estrellas del tipo conocido como variables cefeidas. Éstas son estrellas cuyo brillo varía de manera periódica en una escala de tiempo de semanas o meses, y se sabía que el período de la variación estaba relacionado con la cantidad total de luz emitida por la estrella. Este hecho puede utilizarse para medir distancias en nuestra propia galaxia, ya que si conocemos la luz que emite una estrella y la que recibimos en realidad en la Tierra, un sencillo cálculo nos indica a qué distancia se encuentra. Hubble, mediante la aplicación de esta conocida técnica en las estrellas observadas en la

nebulosa de Andrómeda, pudo demostrar que éstas (y por tanto la nebulosa) debían estar casi a un millón de años luz de distancia. Como la Vía Láctea sólo tiene un tamaño de 100.000 años luz, la única conclusión posible del trabajo de Hubble era que la Vía Láctea debía ser sólo una de las muchas galaxias del Universo. Desde la época de Hubble, el número de galaxias que se conocen ha pasado del millón, y el incremento de su número no muestra signos de aminorarse.

Del mismo modo que los seguidores de Copérnico tuvieron que olvidarse del concepto de la Tierra y del Sistema Solar como centro del Universo, los científicos del siglo XX tuvieron que abandonar el concepto de la unicidad de la Vía Láctea. Resulta que vivimos en una galaxia bastante típica, sin nada que la distinga de las demás, excepto el hecho de ser nuestro hogar.

LA EXPANSIÓN UNIVERSAL

Una vez quedó firmemente establecida la existencia de otras galaxias, los estudios posteriores de Hubble revelaron otro hecho importante (y, en aquel momento, sorprendente). Resultaba que la distancia entre la Vía Láctea y las demás galaxias estaba aumentando, que las otras galaxias se estaban alejando de nosotros. Además, resultaba que cuanto más alejada estuviera la galaxia en cuestión, más rápida era la velocidad de recesión. Esta observación es tan crucial para el desarrollo de la cosmología moderna que vale la pena detenerse un poco para comprender cómo llegó Hubble a este resultado.

Cualquiera que haya permanecido cerca de la vía del ferrocarril y haya escuchado el silbido de un tren al pasar, habrá observado que su tono cambia cuando el tren se acerca, y después se pierde en la distancia. Mientras se aproxima, el tono del silbido sube (se hace más agudo), y cuando se aleja, baja (se hace más grave). Éste es un ejemplo específico de un fenómeno muy general asociado con ondas de todas clases y

conocido como efecto Doppler. Las figuras 1 y 2 pueden ayudarnos a comprender el efecto.

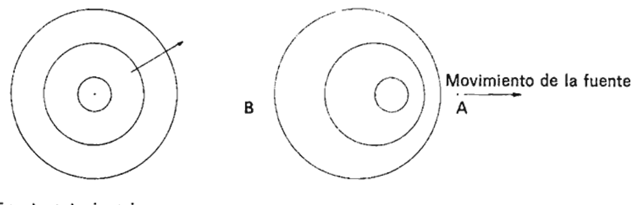


Fig. 1 Fig. 2

La fuente de la onda sonora (el silbato del tren, en nuestro ejemplo) crea unas repetidas variaciones de presión en el aire. Cuando estas variaciones de presión alcanzan el oído, hacen vibrar el tímpano, y oímos un sonido. Cuantas más crestas de alta presión golpean el oído cada segundo, más rápidamente vibra el tímpano y más alto es el tono del sonido que percibimos. Si la fuente es estacionaria, como en la figura 1, las ondas se mueven en esferas concéntricas espaciadas de manera uniforme. Cualquier observador oirá el mismo tono, dondequiera que esté situado.

En cambio, si la fuente de sonido se mueve (como en nuestro tren), la situación es diferente. Cada onda se propaga como una esfera, pero esa esfera estará centrada en la posición de la fuente en el instante en que se emitió la onda. Esto significa que las esferas ya no serán concéntricas, sino que se agruparán, tal como se indica en la figura 2. Un observador situado en frente de la fuente, en A, encontrará que las crestas de las ondas están separadas por menos espacio de lo normal, y oirá un sonido con un tono más alto. A la inversa, alguien situado detrás de la fuente, en B, encontrará las crestas más separadas y oirá un sonido con un tono más bajo. Esto explica el fenómeno del silbido del tren.

Este efecto fue sugerido por vez primera por el matemático Christian Johann Doppler, en Praga, en 1842, y fue verificado de modo experimental tres años más tarde por el científico holandés Christoph Buys Ballot. Su experimento fue tan directo como pintoresco. Reunió a un grupo de músicos que

tenían un sentido perfecto del tono, e hizo pasar delante de ellos un grupo de trompetas en un tranvía abierto. Comparado con esta técnica, nuestros métodos de comprobación modernos, que emplean micrófonos y osciloscopios sensibles, parecen terriblemente prosaicos.

La luz y el sonido son fenómenos ondulatorios y, como es natural, el argumento de Doppler es aplicable en ambos casos. Esto significa que si miramos la luz emitida por un átomo particular en una galaxia lejana y luego la emitida por el mismo tipo de átomo en nuestro laboratorio, la comparación de las longitudes de onda percibidas nos permitirá saber si la galaxia se está moviendo hacia nosotros o se está alejando. En el caso de la luz, el agrupamiento de las crestas de las ondas visto en el punto A de la figura 2 se percibirá como un corrimiento hacia la parte azul, o de alta frecuencia, del espectro, mientras que en el punto B se percibirá como un corrimiento hacia la parte roja, o de baja frecuencia.

Lo que Hubble encontró es que todas las galaxias cuya distancia pudo determinar con sus instrumentos mostraban un corrimiento hacia el rojo, lo que indica que todas las galaxias se están alejando de nosotros. Además, Hubble concluyó a partir de sus datos que cuanto más alejada se encontraba la galaxia (cuya distancia se medía con los datos de las variables cefeidas), mayor era su corrimiento hacia el rojo.

La imagen que surgió del trabajo de Hubble, por lo tanto, era la de un Universo en expansión, con todas las galaxias alejándose unas de otras. Conociendo la separación de las galaxias en el momento actual y la velocidad con la que se están separando, es un simple ejercicio imaginar que “pasamos la película al revés” y dejamos que las galaxias se vayan acercando cada vez más. Por lo tanto, a partir de la situación actual de las galaxias, podemos deducir, en principio, la cantidad de tiempo que ha transcurrido desde que toda la materia del Universo existía en un estado altamente compacto. El número obtenido de este modo es lo que se llama tiempo de Hubble o edad de Hubble, y representa una estimación aproximada de la edad del Universo. Este número tiene una historia larga y algo complicada.

La medida de la edad de Hubble requiere una comprensión muy buena de las estrellas variables cefeidas y unas medidas muy precisas del corrimiento hacia el rojo de otras galaxias. Por la misma naturaleza de las cosas, aquellas galaxias que están más alejadas presentarán el mayor corrimiento hacia el rojo, y en el caso de esas galaxias es donde podemos esperar una mayor precisión en las medidas del efecto Doppler. Por otra parte, precisamente en estas galaxias será donde las variables cefeidas serán más difíciles de distinguir. Para las galaxias cercanas la situación se invierte. En otras palabras, la medida del corrimiento hacia el rojo y de la distancia, con una exactitud suficiente para hacer una determinación precisa de la edad de Hubble, no es un asunto trivial. Cuando Hubble hizo su primera medición en 1931, estableció la edad del Universo en sólo unos mil millones de años, unas diez veces menos que el valor aceptado en la actualidad. El problema con los mil millones de años de Hubble era que la edad de la Tierra determinada por los geólogos se creía que era de varios miles de millones de años, y difícilmente la Tierra podía ser más vieja que el Universo. La mejora de las técnicas y una recalibración del período de las variables cefeidas han producido cambios repetidos en la estimación de la edad de Hubble, e incluso hoy puede ser noticia de primera plana que los astrónomos anuncien que el Universo tiene sólo la mitad (o el doble) de la edad que se había creído previamente. Los creacionistas, como cabía esperar, disfrutan con estos hechos y los toman como evidencia en contra de la idea entera del Universo evolutivo. Una actitud mucho más razonable es la de un astrónomo en cuyos juicios he aprendido a confiar: «La edad de Hubble es de 15.000 millones de años, en más o en menos un 50%.» En otras palabras, la mejor estimación de la edad de Hubble es de 15.000 millones de años, valor que adoptaremos para el resto de este libro. Sin embargo, no podemos descartar edades tan bajas como 7.000 millones o tan altas como 20.000 millones de años. Puesto que esta incertidumbre no tiene una importancia crucial para la mayor parte de la cosmología moderna, no se considera que una mejor

determinación de la edad de Hubble sea una de las metas importantes de la astronomía.

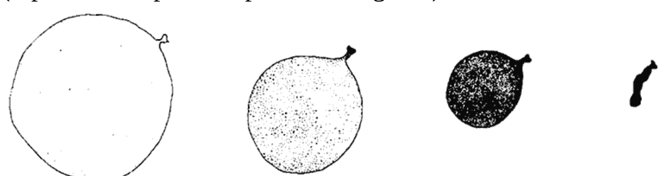
La única fuerza que actúa ahora sobre una galaxia que se aleja es la atracción gravitatoria del resto de las galaxias. Conocemos lo suficiente sobre la manera en que se comporta la materia bajo la influencia de la gravedad para poder seguir la expansión hacia atrás en el tiempo. Sin embargo, no cabe esperar que podamos usar una extrapolación tan simple hasta llegar al Big Bang. En las primeras etapas de la expansión, la densidad de la materia debió ser lo suficiente elevada para suponer que las fuerzas eléctricas e incluso las nucleares jugaron un papel en el desarrollo del Universo. No es un hecho trivial, ya que nuestras teorías nos indican que la actual expansión uniforme no tiene por qué ser típica de las épocas anteriores.

EL BIG BANG

A pesar de la incertidumbre en la edad exacta del Universo, se acepta normalmente que la expansión que vemos en la actualidad empezó hace unos 15.000 millones de años, a partir de una situación en la que toda la materia estaba en un estado altamente condensado. El término *Big Bang* (en castellano, “gran explosión”) se utiliza para designar este suceso, y la imagen que sugiere de un Universo formado por fragmentos arrojados desde un centro en explosión es esencialmente correcta. El único problema de esta imagen simple es que parece implicar que el Big Bang fuera parecido a la explosión de un proyectil de artillería, cuyos fragmentos volaran a través del espacio. En realidad, los cosmólogos modernos tienen una visión mucho más compleja del proceso.

La teoría de la relatividad nos muestra que hay una delicada interconexión entre la materia y el espacio. Si nos imaginamos el espacio libre como una especie de malla dibujada en el vacío, la materia produce el efecto de distorsionarla. Según esta imagen, la expansión de la materia que llamamos Big Bang arrastraría consigo la malla y la estiraría como si

fuera una lámina de caucho elástico. Una forma de visualizar la expansión tal como la ven los cosmólogos modernos es imaginar un globo que se está hinchando, con una serie de puntos repartidos por su superficie, cada uno de los cuales representa una galaxia. Para una persona situada en uno de estos puntos, no se trata tanto de la expansión del globo a través del espacio como de una expansión del propio espacio (representado por la superficie del globo).



Hay otro punto importante de la expansión universal que puede comprenderse a partir del ejemplo del globo. Si uno estuviera en uno de los puntos y mirara a su alrededor, le parecería estar quieto y que todos los demás puntos se alejaban de él. En otras palabras, le parecería ser el centro de la expansión universal y ocupar un lugar privilegiado en el Universo. Sin embargo, esto no sería cierto, ya que es evidente que un observador en cualquier otro punto vería exactamente lo mismo. Cada uno se ve a sí mismo como si fuera estacionario y a todos los demás alejándose, por lo que ningún observador es privilegiado respecto a los demás.

Éste es un caso especial del principio de la relatividad. En su forma más general, este principio establece que las leyes de la naturaleza deben ser tales, que todos los observadores deben encontrar que son iguales, es decir, que no hay un sistema de referencia privilegiado desde el cual observar el Universo. Este principio, compatible con la forma de pensar del siglo XX, está implícito en la física contemporánea en sus mismos fundamentos. En cierto sentido, juega un papel en la ciencia moderna similar al del geocentrismo en la ciencia antigua y medieval. Es un principio que incluimos en nuestra percepción del Universo porque creemos que tiene que ser cierto y, por el momento, no hemos encontrado ninguna evi-

dencia experimental de que no sea así. Sin embargo, el geocentrismo también funcionó maravillosamente durante milenios.

ECOS

Aunque la idea de que el Universo puede haberse originado en una explosión con caracteres de cataclismo hace miles de millones de años está implícita en los descubrimientos de Hubble, éstos no nos obligan a aceptar el Big Bang. Los cosmólogos son gente extraordinariamente imaginativa y capaces de sugerir explicaciones alternativas de cualquier hecho en un abrir y cerrar de ojos. Durante mucho tiempo el rival principal de la idea del Big Bang fue una teoría en la que, al alejarse las galaxias las unas de las otras, se creaba nueva materia en los vacíos y se formaban nuevas galaxias que, a su vez, se alejaban y eran reemplazadas por otras aún más nuevas. La simple existencia de los datos del corrimiento hacia el rojo en y por sí mismos no podían distinguir entre el Big Bang y esta alternativa. Antes de poder aceptar el Big Bang, había que encontrar alguna confirmación más directa.

Podemos comprender cuál resultó ser esta evidencia directa si nos concentramos en el hecho de que el Universo, en sus primeras fases de desarrollo, tuvo que estar muy caliente. Los físicos saben que todo objeto cuya temperatura excede del cero absoluto radia energía y que el tipo de energía radiada depende de su temperatura. Cualquiera que haya observado cómo el elemento calefactor de una estufa eléctrica cambia de rojo oscuro a naranja brillante tiene una experiencia de primera mano para corroborar esta afirmación. Dicho elemento produce un tipo particular de radiación que llamamos luz visible, a la cual nuestros ojos son sensibles y que, por lo tanto, podemos ver directamente.

Incluso después de que el elemento calefactor se haya desconectado y de que su color haya vuelto a ser normal, sigue radiando. Puede comprobarse acercando la mano a la estufa. Se nota calor, aunque no exista radiación visible. Lo

que ha sucedido es que al bajar la temperatura del elemento calefactor, la radiación producida se ha desplazado de la zona visible hacia el infrarrojo. Nuestros ojos no son sensibles a esta radiación (aunque puede ser detectada con facilidad mediante instrumentos y películas fotográficas especiales). Sin embargo, podemos percibir la radiación con nuestra mano. Cuanto más frío está el objeto observado, más lejos está la radiación de ser visible y más elaborado tiene que ser el detector utilizado para ponerla de manifiesto.

El Universo estaba muy caliente hace mucho tiempo y desde entonces ha experimentado una expansión y un enfriamiento progresivos. Igual que el elemento calefactor de la estufa, la radiación producida durante este proceso de enfriamiento se ha desplazado desde las altas energías hasta las bajas, y hace mucho tiempo que ha ido más allá de la zona asociado con la luz visible. De hecho, ya en 1948, los físicos teóricos, tomando en cuenta el ritmo de expansión del Universo, predijeron que 15.000 millones de años después del Big Bang, el Universo se había enfriado hasta una temperatura de 3º por encima del cero absoluto, valor conocido normalmente como 3° en la escala Kelvin, o 3°K. Las leyes de la física indican que un cuerpo produce radiación incluso a estas temperaturas tan extremadamente bajas. Además, también indican que esta radiación se situaría en la zona de las microondas. La radiación de microondas tiene una energía intermedia entre las ondas radio y la radiación infrarroja; es la misma radiación que cuece la comida en un horno de microondas y que emiten los sistemas de radar para aviones. En la actualidad, todo el volumen del Universo estaría inmerso en esta radiación y deberíamos observarla en la Tierra, procedente de cualquier dirección en la que miremos. A este respecto, estamos en una posición análoga a la de un observador rodeado por el fuego: nota que el calor le llega desde todas las direcciones.

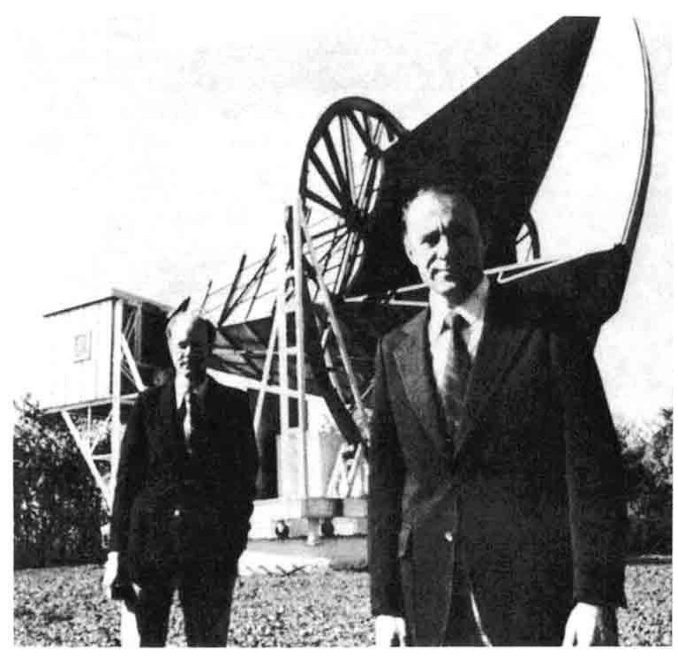
Existe otra forma de considerar esta predicción. Durante las primeras etapas del Big Bang, cuando el Universo estaba muy caliente, la radiación no podía viajar muy lejos sin encontrar algún tipo de materia. Estas colisiones continuas te-

nían el efecto de asegurar que la radiación era del tipo característico de la temperatura general del Universo en aquel tiempo. En la práctica, garantizaban que la radiación fuera principalmente en forma de rayos X o gamma. Entonces, unos 500.000 años después del Big Bang, el Universo experimentó un cambio súbito que tuvo el efecto de disminuir la probabilidad de que la radiación colisionara con la materia. (Esta transición tan importante se discutirá con detalle en el capítulo siguiente.) Podemos imaginar la radiación después de este momento como un gas que está confinado, calentado a una alta temperatura, y que se libera de repente. Se expansionará con el resto del Universo, y al hacerlo se enfriará. No resulta difícil ver que es posible predecir la temperatura del gas de radiación en cualquier momento del futuro, y de aquí es de donde proceden precisamente los 3°K. Es la temperatura a la que ha bajado el gas de radiación en el momento actual.

Por consiguiente, resulta irrelevante considerar la radiación como característica de un Universo en expansión o como un gas en expansión que cesó de interaccionar con la materia hace mucho tiempo a una alta temperatura. En ambos casos, llegamos a la conclusión de que si realmente existe en el Universo una radiación de microondas universal, sería una forma directa de percibir las primeras etapas del Big Bang, de forma muy parecida en que la luz emitida por una estrella lejana nos permite verla y determinar su estado. Sería bonito poder decir que una secuencia clara de predicción, experimentación y confirmación condujo a la aceptación de esta idea, pero como sucede a menudo en la ciencia, la cadena real de acontecimientos no fue tan sencilla.

A principios de la década de los sesenta se lanzaron los primeros satélites de comunicaciones primitivos. Los de la serie Echo eran poco más que esferas reflectoras puestas en órbita, diseñadas para reflejar hacia la Tierra las señales de un transmisor situado en ésta. (Resulta difícil recordar lo reciente que es el moderno y sofisticado sistema de comunicaciones por satélite.) Arno Penzias y Robert Wilson, dos científicos de los Bell Telephone Laboratories en Holmdel, New Jersey, habían estado trabajando en la modificación de un gran apara-

to, en forma de cometa, que se había utilizado como receptor en una serie de experimentos necesarios para probar la capacidad del satélite para devolver las señales hacia la Tierra. Como el satélite estaba en continuo movimiento, este receptor podía orientarse en cualquier dirección, a pesar de su extraordinario tamaño. Esto resultaba muy útil, ya que un receptor ordinario de radio o una antena de radar hubieran quedado inundados por la radiación emitida por fuentes terrestres o atmosféricas. A menos que sea posible apuntar hacia el cielo los modernos dispositivos de recepción, una señal extraterrestre no puede oírse.

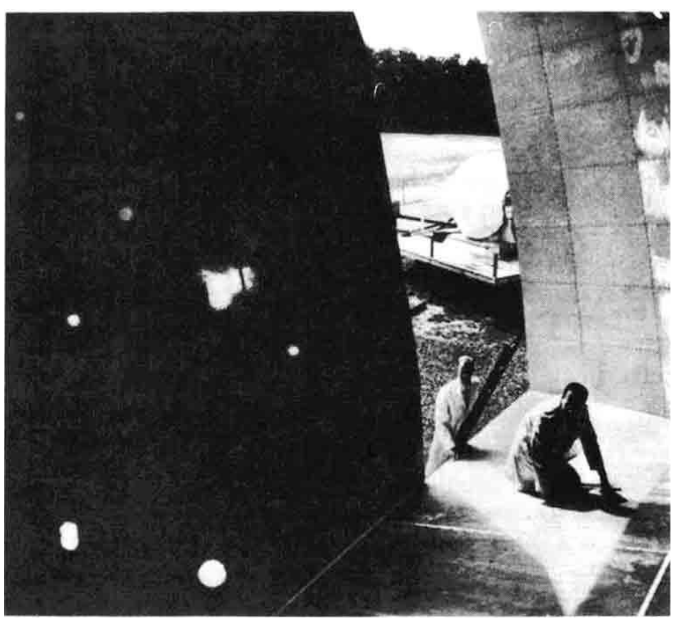


Los doctores Robert W. Wilson (izquierda) y Arno A. Penzias con la antena reflectora de corneta de los Bell Telephone Laboratories, que fue utilizada en los experimentos de los proyectos Echo y Telstar y en la medición de la inexplicada radiación de ruido de la galaxia. *Foto cortesía de Bell Laboratories.*

Penzias y Wilson tenían la intención de utilizar su insólita antena para realizar un catálogo de las radiofuentes situadas fuera del plano de nuestra galaxia. Encontraron que había un nivel de "ruido" inexplicablemente alto en sus lecturas, parecido al ruido de fondo de una radio o a la nieve de una pantalla de televisión. Dedicaron una gran cantidad de tiempo para tratar de librarse de esta señal, porque creían que procedía de su instrumento y no del cielo. Hay muchas formas en que el instrumento podía producir este efecto, algunas debidas a efectos electrónicos complicados y otras a efectos muy corrientes. Por ejemplo, en cierto momento durante el experimento, una pareja de palomas fijó su residencia en el comete de la antena y cubrió parte del aparato con lo que se describió como una "sustancia dieléctrica blanca". Como es natural, pudo suprimirse esta fuente de error, pero la señal inesperada persistía sin importar cuántos efectos extraños se eliminaran.

En 1964 empezó a funcionar la red invisible que existe entre los científicos. Un joven teórico de Princeton, P. J. E. Peebles, dio un seminario sobre la teoría del Big Bang en la John Hopkins University, y presentó parte de su propio trabajo sobre el problema de la radiación de fondo de microondas. Algunas palabras sobre sus resultados llegaron hasta el Carnegie Institute en Pittsburgh, hasta el Massachusetts Institute of Technology y hasta Penzias en New Jersey a través de una serie de llamadas telefónicas sobre temas sin ninguna relación con el experimento. Como es natural, una vez se juntaron los teóricos y los experimentales, la verdadera naturaleza del ruido en la antena resultó obvia. De hecho, no era ruido lo que se estaba detectando, sino la radiación de 3°K, que es una consecuencia necesaria del Big Bang. Se cuenta un chiste entre astrofísicos en el que uno de los experimentadores, al darse cuenta de este hecho, dice: «O estamos viendo una pila de m... de paloma o la creación del Universo.» En todo caso, no se tardó mucho en establecer que la radiación detectada no estaba asociada con la antena ni con ninguna galaxia o estrella en particular, sino que era realmente universal. En los años siguientes al anuncio del resultado del Bell Lab, se realizaron muchas medidas independientes de la radiación de microon-

das y todas ellas corroboraron las conclusiones originales. Por su trabajo, Penzias y Wilson fueron galardonados con el premio Nobel de física en 1978.



El doctor Arno Penzias (derecha) inspecciona el interior de la antena. Después de medir cuidadosamente y de tener en cuenta todas las fuentes conocidas de radiación de ruido de la atmósfera terrestre y de la galaxia, así como de la antena y del equipo receptor asociado, Penzias y Wilson encontraron una cantidad residual de radiación de ruido que no podían explicar. Tras consultar con colegas de Princeton, propusieron la teoría de que esta radiación era un resultado del Big Bang. *Foto cortesía de Bell Laboratories.*

La cadena de acontecimientos que condujo al descubrimiento de la radiación de 3°K ilustra uno de los puntos más importantes, aunque menos comprendidos de la investigación científica: los descubrimientos más importantes se producen muchas veces en experimentos que buscan cosas completamente diferentes. Esto es lo que hace tan difícil planificar la investigación básica de una manera racional. Nunca se puede estar seguro de cuándo un experimento va a producir un descubrimiento inesperado en otra área distinta de la ciencia.

Debemos considerar otro punto acerca del fondo de microondas cósmico. Hemos dicho que uno de los preceptos fundamentales de la ciencia moderna es que no hay ningún sistema de referencia privilegiado. ¿Pero, no es precisamente uno de estos sistemas de referencia aquel en el que ocurrió el Big Bang y en el que la radiación de microondas es exactamente isótropa (véase el glosario)? Si consideramos seriamente la analogía del gas en expansión, un observador que no se mueva respecto a la bola de fuego universal verá la misma radiación tanto si mira a su izquierda como a su derecha. Por el contrario, un observador que se mueva respecto a la bola de fuego verá la radiación desplazada hacia el azul si mira hacia delante y hacia el rojo si mira hacia atrás. (Es fácil convencerse de este hecho con el mismo tipo de argumento utilizado para el efecto Doppler.) ¿No supone esta situación una violación del principio de la relatividad?

No, no lo es. Sólo se establece que hay un único sistema de referencia en el que el fondo cósmico es realmente uniforme, y que los observadores en cualquier otro sistema detectarán ligeros corrimientos. Sin embargo, los dos observadores de nuestro ejemplo verán que son válidas las mismas leyes de la naturaleza en sus respectivos sistemas de referencia. Puede demostrarse incluso que la exigencia de que vean las mismas leyes de la física obliga a que vean configuraciones distintas de la radiación cósmica. No hay nada en el principio de la relatividad que exija que todos los observadores vean las mismas cosas; sólo se exige que vean las mismas leyes. El hecho de que sólo en un sistema de referencia se observe un fondo de microondas uniforme no es más sorprendente que el hecho de que sólo hay un sistema de referencia en el que la superficie de la Tierra sea estacionaria.

De paso vale la pena indicar que se ha puesto de manifiesto, mediante delicadas observaciones con receptores de microondas a bordo de aviones que volaban a gran altura en la atmósfera, que el Sistema Solar se está moviendo en realidad a través de la radiación de fondo a una velocidad de 600 km/s en la dirección de la constelación de Leo.

CONCLUSIÓN

Los acontecimientos de la última mitad de siglo nos han mostrado que la Vía Láctea es, en definitiva, sólo una de los millones de galaxias del Universo y que todas las galaxias presentan un movimiento uniforme que puede caracterizarse bien como una expansión.

Si realizamos el experimento mental de invertir la expansión, llegamos a la conclusión de que han transcurrido unos 15.000 millones de años desde que el Universo se inició en un acontecimiento llamado Big Bang. La edad del Universo determinada de esta forma no se conoce con mucha precisión, pero no es necesario conocerla con exactitud para ninguno de los argumentos importantes de este libro.

La evidencia más importante y dramática del comienzo del Universo en el Big Bang procede del descubrimiento de la radiación de microondas universal. Esta radiación es del tipo que estaría asociado a un cuerpo con una temperatura de 3° por encima del cero absoluto, temperatura que habría alcanzado hoy el gas de radiación en expansión resultante del Big Bang. En cierto modo, los experimentos de microondas están oyendo las reverberaciones de la explosión con que empezó el Universo.

Dada esta imagen de nuestro pasado, queda clara la meta de la ciencia. Mediante la utilización de leyes físicas conocidas, debemos investigar hacia el pasado la expansión universal y llegar tan cerca como sea posible del momento mismo de la creación. Tal vez el hecho más sorprendente sea que en la actualidad estamos en situación de describir el Universo tal como existió durante la mayor parte de su primer segundo de existencia. Para hacerlo, tendremos que aprender algo acerca del comportamiento de la materia a muy altas temperaturas, así como acerca de la manera en que se aglomera. La razón por la que necesitamos estos conocimientos se hará evidente cuando reflexionemos acerca de las etapas de la evolución del Universo más cercanas a nuestro tiempo, tema al que vamos a dedicar ahora nuestra atención.

II. LAS EDADES DEL UNIVERSO

Todo el mundo es un escenario,
y *todos los hombres* y *mujeres sólo son actores:*
tienen sus salidas y *sus entradas;*
y *un hombre durante su tiempo representa muchos papeles,*
y *sus actos son siete edades.*

WILLIAM SHAKESPEARE
A vuestro gusto

ÁTOMOS

Lo más intrigante de la teoría del Big Bang es que nos revela que el Universo no estuvo siempre en el estado en que lo vemos ahora. Las estrellas y las galaxias parece que no tienen edad, y de hecho es así, comparadas con una vida humana o con el tiempo que abarca la historia escrita. Pero incluso las estrellas "eternas" nacieron en algún momento del pasado y, con toda seguridad, morirán en algún momento del futuro. La mejor manera de considerar la escala de tiempo en relación con el nacimiento del Universo es imaginarse los 15.000 millones de años transcurridos desde el Big Bang comprimidos en un solo año, que llamaré año galáctico. En esta escala de tiempo, toda la historia escrita del hombre no comprende más de 10 segundos. Las estrellas más grandes —las que queman combustible más deprisa— viven menos de una hora. El Sol y el Sistema Solar fueron creados en septiembre y puede esperarse que el Sol siga en un estado muy parecido al actual durante unos meses galácticos más. La raza humana ha existido durante una hora o dos, valor que depende del resultado del debate actual entre los antropólogos sobre los primeros restos humanos.

El año galáctico proporciona una manera útil de visualizar las etapas más recientes de la evolución del Universo, ya que

la escala de tiempo de estas etapas es muy grande. Empecemos nuestra descripción de la historia del Universo retrocediendo en el tiempo (hacia el Big Bang) desde el presente y calculando el tiempo en términos del año galáctico. Si el momento actual es el 31 de diciembre de ese año, al retroceder a través del invierno, otoño y verano, veremos muy pocos cambios a nuestro alrededor. Al acercamos a enero podremos observar que los elementos químicos pesados se hacen algo menos abundantes. Esto se debe a que todos los elementos más pesados que el helio, incluidos el hierro de nuestra sangre y el calcio de nuestros huesos, se fabricaron en estrellas que después murieron y restituyeron los elementos que habían producido al medio interestelar, donde se mezclaron con la materia a partir de la cual se formarían nuevas estrellas. El Sol y el Sistema Solar, al haberse formado en tiempos relativamente recientes, contienen más cantidad de estos materiales que los sistemas más viejos. Sin embargo, aparte de este efecto realmente pequeño, el Universo presentaría un aspecto casi igual en enero del año galáctico que en diciembre. Si detuviéramos nuestro viaje por el tiempo en un momento cualquiera y miráramos a nuestro alrededor, veríamos la mayor parte de la materia concentrada en galaxias, y esas galaxias se estarían alejando las unas de las otras. Por lo tanto, durante casi toda la vida del Universo, no ha tenido lugar ningún cambio fundamental.

De hecho, una de las cosas sorprendentes que advertimos al explorar la historia de nuestro Universo es lo mucho que se parece a las siete edades en que William Shakespeare dividía la vida humana. A unos períodos en que la apariencia de las cosas permanece más o menos constante suceden de repente unas explosiones cortas de cambios revolucionarios, en las que el aspecto del Universo se altera de manera drástica e irreversible. Todos estos períodos de cambio están relacionados con un hecho central: cuanto más retrocedemos en el tiempo, más aumenta la temperatura del Universo.

La razón no es difícil de entender. A medida que retrocedemos en el tiempo, la materia del Universo se encuentra cada vez más comprimida. Es un hecho que esta compresión

produce calor, como sabe cualquiera que haya usado una bomba manual para hinchar un neumático. La compresión continua del aire por el émbolo en la bomba calienta el cilindro de forma notable. Al aumentar la temperatura de un objeto, las moléculas que contiene se mueven cada vez más deprisa. Puesto que las moléculas de cualquier material experimentan colisiones frecuentes entre sí, es lógico suponer que estas colisiones se vuelvan más violentas al aumentar la temperatura.

Si imaginamos que retrocedemos en el tiempo a través del año galáctico, veremos que las galaxias (con un aspecto muy parecido al actual) se van acercando cada vez más unas a otras. El efecto sería parecido a ver pasar una película al revés. El film mostraría lo mismo desde el momento actual (31 de diciembre) hasta aproximadamente una hora antes del principio del año galáctico, el 1 de enero. Sólo al llegar a la primera hora del año galáctico (menos de un millón de años de tiempo real desde el Big Bang) se haría evidente algún cambio en el Universo. Al proseguir la proyección de la película pasada al revés, veríamos juntarse las galaxias y formar una única masa no diferenciada de átomos. Esto sería, por supuesto, un cambio, pero no fundamental, ya que aun cuando hubiera variado la estructura global del Universo, la unidad básica de materia seguiría siendo el átomo, un objeto eléctricamente neutro en el que hay tantos electrones con carga negativa alrededor del núcleo como protones con carga positiva dentro de este núcleo.

Si continuáramos retrocediendo en el tiempo, veríamos esta masa de átomos contraerse y calentarse durante una media hora. En este punto (unos 500.000 años de tiempo real después del Big Bang), la temperatura sería lo suficientemente alta y las colisiones lo suficientemente violentas para separar los electrones de sus núcleos. Los átomos dejarían entonces de existir y la materia aparecería en un estado fundamentalmente nuevo, en el que las partículas de carga opuesta son libres de moverse de manera independiente unas de otras. Este estado de la materia se llama plasma. En nuestros días, se producen plasmas de modo rutinario en los laboratorios de

física, de forma que conocemos bien el comportamiento de la materia en este estado.

La transición de átomos a plasma puede imaginarse como algo análogo a la fusión de un cubito de hielo. A baja temperatura, las moléculas de agua están dispuestas en una estructura cristalina rígida que llamamos hielo. Al subir la temperatura y llegar a 0°C, el movimiento de las moléculas en el hielo se vuelve tan violento que supera las fuerzas que mantienen la forma del cristal. En ese punto el hielo se convierte en agua. Una nueva forma de materia (líquida) reemplaza la antigua (sólida).

La diferencia principal entre el hielo en fusión y la transición de un Universo de átomos a un Universo compuesto de plasma es que el estado de plasma no se produce a una única temperatura bien definida. Si se calienta un gas, ocurre un cambio gradual a medida que más y más de sus átomos constituyentes experimentan colisiones violentas y pierden sus electrones. Por último, la temperatura sube lo suficiente para que cualquier electrón que se una a un núcleo sea desalojado con rapidez. En general, una temperatura relativamente baja (unos pocos miles de grados) es suficiente para producir un plasma bastante bueno, y a una temperatura de 10 millones de grados (más o menos una décima parte de la temperatura en el centro del Sol), no hay en la materia ningún electrón ligado. El Universo estaba a la más alta de estas temperaturas unos cientos de miles de años después del Big Bang y se enfrió hasta la más baja antes de tener un millón de años de edad. La conversión del plasma en átomos era completa cuando el año galáctico tenía 30 minutos; todo el resto del año hasta el momento actual —virtualmente la vida entera del Universo— lo ocupa la era presente, la última etapa en el desarrollo del Big Bang. Aunque ésta es con mucho la era más larga del año galáctico, es también el período menos interesante para los científicos. No es que no suceda nada durante esta etapa final, ya que es entonces cuando se forman las estrellas, aparecen los planetas y se desarrolla la vida. Es que justamente conocemos a partir de una experiencia de primera mano las leyes de la naturaleza que producen estos efectos y, aunque quedan

cantidad de preguntas importantes por responder acerca de los procesos que tienen lugar, alguien que quiera reflexionar acerca de cuestiones fundamentales centra, como es natural, su atención en la primera media hora del año galáctico. Es allí, en el comienzo mismo del Universo, donde los nuevos conocimientos aguardan para ser descubiertos.

El estado actual del Universo, por lo tanto, estuvo precedido por la “congelación” del plasma caliente en un conjunto de átomos, menos de un millón de años después del Big Bang, hace casi 15.000 millones de años. Para la mayor parte de la materia, este nuevo estado atómico fue transitorio, ya que poco después de ocurrir esta congelación, empezó otro proceso natural. Bajo la influencia de la gravedad, la materia en expansión empezó a agruparse. Estos agregados formarían más tarde las galaxias. En cada uno de ellos, la fuerza de gravedad proseguía su acción y atraía grandes nubes de gas para formar nebulosas. Aunque el movimiento global era de expansión universal, a escala local la materia se agrupaba debido a la fuerza de atracción gravitatoria. Cuando se acumulaba suficiente materia en un punto, su atracción gravitatoria combinada atraía la que había a su alrededor, y la adición de nueva materia incrementaba la fuerza gravitatoria y atraía aún más cantidad de ella. Al aumentar la masa del cuerpo (una protoestrella), la materia se comprimía y se calentaba en una especie de repetición a la inversa de la expansión después del Big Bang, aunque esta vez la escena tenía lugar a escala local en lugar de universal. Mucho antes de que la temperatura en el centro del cuerpo alcanzara el punto en que se inician las reacciones de fusión para crear una verdadera estrella, las colisiones atómicas habían adquirido de nuevo la suficiente violencia para despojar a los átomos de los electrones acabados de adquirir y volver a crear el estado de plasma. En cierto modo, ese proceso de colapso gravitatorio y destrucción atómica deshacía el proceso de formación atómica que había tenido lugar en la transición hacia la etapa final del Big Bang. En consecuencia, la mayor parte de átomos sólo poseyeron electrones durante un corto período de tiempo, tal vez menos de un millón de años, entre el momento en que el Big Bang se

hubo enfriado lo suficiente para que los átomos pudieran sobrevivir a las colisiones y el momento en que esos átomos se incorporaron a las estrellas todavía en formación.

En el capítulo siguiente discutiremos con detalle uno de los problemas más sorprendentes y duraderos asociados a la cosmología del Big Bang. Veremos que la formación de galaxias y estrellas, con la vuelta consiguiente de una buena parte de la materia del Universo al estado de plasma, no pudo haber ocurrido hasta que la explosión inicial se enfriara lo suficiente para permitir, en primer lugar, la formación de los átomos. Una vez ocurrido esto, es relativamente fácil calcular el tiempo que tardó la acreción y agolpamiento de la materia. Hasta hace muy poco no ha habido una explicación aceptada en general de cómo se pudieron formar las galaxias con la suficiente rapidez para dar razón del Universo que observamos hoy. Parece ser que, cuando los átomos se formaron a partir del plasma, la materia ya estaba extendida de manera demasiado tenue para que el proceso de acreción galáctica pudiera tener lugar como hemos descrito. La importante transición que ocurrió unos 500.000 años después del Big Bang, aunque es fácil de describir y de imaginar, es más complicada de lo que parece a primera vista. Volveremos sobre este punto en el curso del libro.

NÚCLEOS

La etapa de la vida del Universo, que terminó con la formación de los átomos 500.000 años después del Big Bang, tuvo su génesis en los hechos que sucedieron sólo 3 o 4 minutos después del momento de la creación. También aparece aquí la secuencia de cambio súbito seguido de un largo período de relativa quietud que vimos antes. Entre las edades de 3 minutos y 500.000 años, el Universo estaba formado por un plasma en expansión sin ningún átomo. Los núcleos en el plasma eran protones (el núcleo de un átomo ordinario de hidrógeno), deuterones (un tipo de núcleo de hidrógeno constituido por un protón y un neutrón), helio 3 (dos protones y un

neutrón, que se representa de manera usual por ^{3}He), y helio 4 (dos protones y dos neutrones, que se representa por ^{4}He). Todos los demás núcleos, como ya mencionamos antes, se sintetizaron en las estrellas después de la formación de las galaxias.

Hasta unos 3 minutos después del Big Bang, la temperatura era tan alta y las colisiones en el plasma tan violentas, que ningún núcleo podía permanecer cohesionado. Cualquier núcleo que se hubiera formado antes de este momento habría quedado destrozado en estas colisiones. Por lo tanto, de la misma forma que los átomos no pueden haber existido hasta transcurridos 500.000 años desde el momento de la creación, los núcleos tampoco pueden haber existido hasta después de 3 minutos. La razón física para ambas situaciones es similar: hasta los momentos indicados, la temperatura del Universo era tan alta que las colisiones podían romper los enlaces que de otra forma hubieran mantenido juntas las respectivas partículas constituyentes.

La temperatura a los 3 minutos era de unos mil millones de grados, algo menos de cien veces más caliente que la temperatura en el centro del Sol. Pero si la transición de plasma a átomos no ocurrió de repente, sino a lo largo de un período de tiempo, la transición anterior de protones y neutrones a núcleos fue algo complicada. Además de las razones debidas a la naturaleza difusa de la conversión plasma-átomos discutida en la sección anterior, hay una dificultad adicional asociada con el hecho de que el proceso de nucleosíntesis, la formación de núcleos, implica una serie de pasos según una secuencia especial.

Para comprender lo que esto significa, imaginemos un conjunto de protones y neutrones a alta temperatura. Un protón y un neutrón pueden colisionar y formar un deuterón. Si este núcleo vive lo suficiente para chocar con otro protón, podría formarse un núcleo de ^{3}He, seguido de ^{4}He después de otra colisión. Por desgracia, el deuterón es el eslabón frágil de esta cadena. Es el núcleo con la unión más débil de todos ellos y por tanto el más susceptible de romperse en una colisión con cualquiera de las partículas o con la radiación en el

plasma. Por lo tanto, el primer paso de la cadena, la formación de un deuterón estable, no ocurrirá hasta que la temperatura esté muy por debajo del punto en que tanto el ^{3}He como el ^{4}He son estables. Una vez la temperatura hubo descendido por debajo de este nivel, algo menos de 4 minutos después de la creación, el resto de los pasos se sucedieron rápidamente y pronto se formó la mezcla de núcleos que caracterizó el Universo durante los 500.000 años siguientes.

PARTÍCULAS ELEMENTALES

Podemos representar la evolución del Universo desde la marca de los 3 minutos hasta el momento actual mediante el tipo de proceso esquematizado en la figura 3. Hay largos períodos en que tanto el tipo de materia presente como los procesos físicos que tienen lugar no cambian. Desde nuestra ventajosa posición actual podemos mirar atrás hacia una meseta dominada por la expansión universal. Cuanto más hacia atrás miramos, más caliente aparece el Universo, pero éste es el único cambio que notamos hasta que nuestra vista se encuentra con el escalón brusco situado alrededor de los 500.000 años. Superado este escalón, encontramos otra meseta ante nosotros, que corresponde a un plasma cada vez más denso y caliente. Ésta termina con otro abrupto escalón alrededor de los 3 o 4 minutos, cuando tiene lugar la nucleosíntesis.

Si ampliamos nuestra inspección al territorio situado más allá de la marca de los 3 minutos, la situación se vuelve un poco menos sencilla. Hay muchos procesos que pueden tener lugar a temperaturas muy elevadas, cada uno con su propia temperatura característica de iniciación y con su efecto característico sobre el Universo como un todo. Al retroceder más allá de la marca de los 3 minutos, ya no encontramos una meseta, sino una serie de colinas y valles tal como se muestra a la derecha de la figura 3. Si una elevación en particular deja de ser una protuberancia de la meseta y se convierte o no en un escalón de transición hacia una nueva era, es sólo una

cuestión de semántica. Para nuestros propósitos, reservaremos términos como *etapa, era, transición* y *cambio abrupto* para aquellos acontecimientos en los que la materia o las fuerzas que gobiernan su comportamiento aparezcan de una forma fundamentalmente nueva. Por lo tanto, la formación de átomos marca el comienzo de una nueva era para nosotros, pero la formación de galaxias, no.

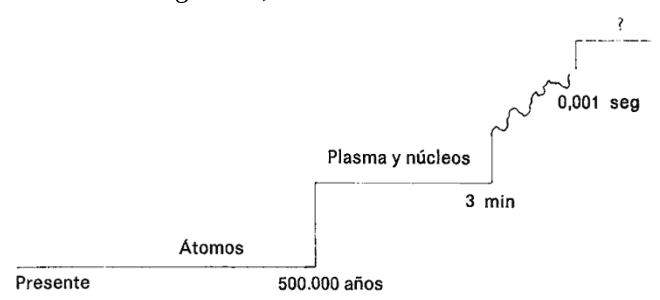


Fig. 3

Según estos términos, la próxima transición verdadera ocurrirá antes de 0,001 segundos, o 1 milisegundo, después del Big Bang. Sin embargo, el tiempo entre 0,001 segundos y 3 minutos está lejos de ser pobre en acontecimientos. Representa el período en que el Universo está dominado por las interacciones de las partículas elementales[1]. Algunos de los procesos que hacen su aparición durante esta era son ejemplos importantes de lo que iremos viendo a medida que nos acerquemos al comienzo, por lo que daremos aquí un breve resumen de ellos.

En el último análisis, todos los acontecimientos importantes acaecidos durante la era de las partículas dependen de la posibilidad de intercambio de la masa y la energía, implícita en la famosa fórmula de Einstein $E = mc^2$. Esta fórmula indica que si tenemos energía suficiente, podemos crear materia a

---

[1] En el libro Los *tres primeros minutos del Universo* de Steven Weinberg se presenta con mucho detalle una excelente discusión sobre este período del Big Bang.

partir de ella y, a la inversa, que si tenemos materia, es posible convertirla en energía. Ambos aspectos de esta ecuación se comprueban a diario en instalaciones de alta tecnología, con la conversión de energía en partículas materiales en los aceleradores y con la conversión de masa en energía en los reactores. En realidad, es muy posible que la electricidad usada para generar la luz que el lector emplea para leer este libro se haya originado en la conversión de materia en energía en un reactor nuclear cercano.

Desintegración del neutrón

Un neutrón aislado en el espacio, sin ninguna interferencia exterior, se desintegrará. En lugar del neutrón original veremos un protón, un electrón y una partícula sin masa, eléctricamente neutra, llamada neutrino. Decimos que el neutrón se "desintegra" en estas otras partículas, y escribimos la reacción simbólicamente como:

$$n \rightarrow p + e + v$$

donde la letra griega *v* (nu) representa el neutrino.

Lo que hace posible esta desintegración es el hecho de que la masa del neutrón es ligeramente superior a las masas combinadas del protón y del electrón. El exceso de masa se convierte en energía, energía que está asociada al movimiento de los tres productos finales de la desintegración. Puesto que el término antiguo usado para los electrones producidos en reacciones de partículas y nucleares es rayo *beta,* este proceso se llama a veces desintegración beta del neutrón. Esta reacción también puede funcionar a la inversa: un neutrino energético puede golpear un protón y producir un neutrón y una partícula de carga positiva, o puede golpear un neutrón y producir un protón y un electrón. Todo lo que se requiere es que el neutrino tenga suficiente energía para producir las masas adicionales de las partículas finales[2].

---

[2] Los expertos notarán que estoy usando el término *neutrino* de una forma amplia para referirme tanto a los neutrinos como a los antineutrinos. La distinción no es importante para esta discusión.

En las primeras etapas de la era de las partículas, antes del final del primer segundo, la temperatura era suficientemente elevada y las colisiones suficientemente energéticas para que los neutrinos convirtieran protones en neutrones y neutrones en protones con igual facilidad. Sin embargo, al bajar la temperatura, dejó de estar disponible la energía necesaria para convertir protones en neutrones, por lo que los primeros empezaron a ser más abundantes. A medida que avanzó la era, los neutrones empezaron a desintegrarse, lo que redujo aún más su abundancia respecto a los protones estables. A los 3 minutos, había sólo una sexta parte de neutrones respecto a los protones y a la media hora, todos los neutrones se habían desintegrado o formaban parte de núcleos.

Aniquilación de partículas

En la siguiente sección veremos que para cada partícula del Universo es posible producir una antipartícula. La partícula y la antipartícula tienen la misma masa, pero todas sus demás características son opuestas. La antipartícula del electrón se llama positrón. Tiene la misma masa que el electrón pero una carga eléctrica positiva. Si un electrón y un positrón se encuentran, experimentan un proceso llamado aniquilación. Las partículas desaparecen en una explosión de energía que, en el caso del electrón y el positrón, toma la forma de una radiación intensa.

Resultará útil imaginar la radiación en la era de las partículas (p. ej., rayos X o rayos gamma) como si estuviera compuesta por unos objetos semejantes a partículas llamadas fotones. Una de las características de la física moderna es el hecho de que ya no es necesario pensar que hay una distinción lógica profunda entre partículas como el electrón y las ondas que forman la radiación. Tanto las partículas como la radiación muestran tener propiedades parecidas a nivel subatómico, y la cuestión de si debemos representarlas como agregados de materia o como ondas es mayormente una cuestión de conveniencia. Si consideramos la radiación compuesta de partículas, la aniquilación electrón-positrón se puede representar como en la figura 4, en la que desaparecen las partí-

culas y dos fotones toman su lugar. La masa de las partículas se ha convertido en la energía de los fotones. El proceso inverso, en el que un fotón golpea algún tipo de blanco y produce un par electrón-positrón (fig. 5), es también posible si el fotón tiene suficiente energía. Por tanto, podemos considerar que los procesos representados en las figuras 4 y 5 producen una especie de equilibrio dinámico en el Universo. Cada vez que desaparece un par a través del proceso de aniquilación, se crea otro par en algún otro sitio mediante un fotón energético. Después de la marca de los 10 segundos, sin embargo, deja de haber suficiente energía para reemplazar los pares que se aniquilan, y los electrones y positrones empiezan a desaparecer a pares. La energía producida por esta aniquilación produce una aberración momentánea en el Big Bang: provoca un ligero aumento de la temperatura incluso durante la expansión. La aniquilación prosigue hasta que desaparece toda la antimateria y el Universo actual, donde sólo existen electrones en abundancia, emerge. La cuestión de por qué habría más materia que antimateria es muy difícil y la abordaremos en el capítulo siguiente.

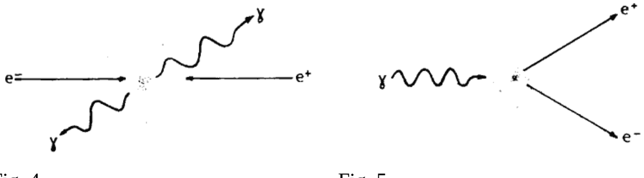


Fig. 4 Fig. 5

Creación de partículas

Hasta ahora sólo hemos hablado de partículas que son más o menos familiares: protones, neutrones y electrones. Sin embargo, si empezamos a explorar el tiempo anterior a 0,01 segundos, encontraremos un mundo muy extraño. En ese período, la energía de los fotones es suficiente para que los procesos de creación de partículas del tipo discutido para los electrones y positrones puedan producir también muchos otros tipos de partículas. Para poner un ejemplo familiar, habrá reacciones en las que se producirán protones y antipro-

tones en las interacciones que comprendan fotones. Se crearán todos los centenares de partículas elementales que han sido descubiertas en las últimas décadas. Todas estas partículas son inestables, y todas se desintegran con mucha más rapidez que el neutrón. En consecuencia, para cada especie se alcanzará un equilibrio entre el ritmo de producción mediante colisiones y el ritmo de desintegración. Los teóricos de las altas energías que tienen inclinación a hacerlo pueden divertirse (y lo hacen) en calcular la demografía detallada del Universo durante esta fase de expansión. Para nuestros propósitos, diremos simplemente que, aunque en este período aparecen muchos tipos nuevos de partículas, ninguna es distinta de manera fundamental de las partículas más corrientes que hemos encontrado. Por tanto, su aparición no constituye una nueva era en el sentido en que estamos usando el término, sino simplemente una proliferación de los tipos ya existentes. En cualquier caso, después de 0,01 segundos, todas estas partículas se desintegran rápidamente en diversas combinaciones de protones, neutrones, electrones, positrones, fotones y neutrinos.

LAS REGLAS DEL JUEGO

A finales de los años 70, la era de las partículas constituía el límite de nuestra visión retrospectiva. La razón de que fuera así no es difícil de descubrir. Poseemos la capacidad tecnológica para producir en nuestros laboratorios todos los fenómenos que hemos encontrado hasta ahora. Los electrones son arrancados de los átomos en las chispas eléctricas normales y, en los laboratorios dedicados al desarrollo de reactores de fusión, se estudian de forma rutinaria plasmas a gran escala. Desde el siglo XIX hemos observado la desintegración de núcleos en la naturaleza y desde los años 30 hemos tenido la capacidad de romper y volver a unir núcleos. El rápido desarrollo de los aceleradores de partículas a partir de los años cincuenta nos ha permitido producir partículas elementales y

estudiarlas a placer. Este estudio ha sido una de las áreas principales de trabajo de la física moderna.

Gracias a este tipo de tecnología, no tenemos que adivinar lo que sucederá cuando un protón, que se mueve a una velocidad determinada, choque con un deuterón durante el breve período de nucleosíntesis en el minuto 3. Podemos producir un protón con esa velocidad y dejar que choque con un deuterón en nuestro laboratorio y ver lo que sucede. La misma observación es válida en lo que respecta al comportamiento de las partículas elementales. Todas las propiedades de la materia y de la radiación en el Universo desde la marca de 0,001 segundos hasta el momento actual pueden descubrirse (por lo menos en principio) en el laboratorio.

Sin embargo, desde los 0,001 segundos hasta el momento de la creación ya no tenemos esta ventaja. Las temperaturas implicadas son tan altas y la energía de las partículas es tan grande que no podemos reproducirlas en el laboratorio, y es bastante probable que no podamos hacerlo durante la vida de ninguno de los lectores de este libro. Por lo tanto, los 0,001 segundos marcan un punto de cambio muy importante en nuestro análisis de los procesos que siguieron al Big Bang. A partir de ahora, exploraremos un mundo tan extraño y poco familiar que nuestra única guía serán nuestras ideas teóricas sobre el comportamiento de la materia y la energía.

Esto no significa que tengamos que abandonar la idea de que la teoría debe superar comprobaciones experimentales antes de ser aceptada. Después de todo, éste es uno de los dogmas centrales de la ciencia moderna. Lo que encontraremos es que las teorías que desarrollemos nos darán una idea muy definida sobre el comportamiento de la materia y la energía a altas energías, y nos permitirán extrapolar y hacer predicciones acerca de cómo será la materia a energías accesibles para nosotros. De esta forma, podemos comprobar las teorías sin tener que reproducir las condiciones reales del Universo primitivo en nuestros laboratorios.

A pesar del hecho de que tenemos que avanzar por regiones de energía y temperatura que no hemos explorado de manera experimental y que probablemente no podremos ha-

cerlo nunca, aún podemos realizarlo de una manera que está en armonía con la forma tradicional del trabajo científico y que no introduce simplemente hipótesis *ad hoc* para explicar lo que encontramos. Este aspecto de la cosmología moderna es tan importante en esta época de "ciencia" creativa que lo vamos a establecer como regla básica (Regla I).

Regla I: Las leyes de la naturaleza que han regido en cualquier momento desde el Big Bang rigen todavía hoy y pueden comprenderse mediante teorías comprobables experimentalmente.

El lector con inclinaciones filosóficas reconocerá en esta regla un principio de la doctrina del uniformitarismo, que surgió durante los debates sobre la evolución geológica en el siglo XIX. No es un principio que pueda ser probado de la misma forma en que se demuestra un teorema de geometría, pero refleja un marco elemental importante en los científicos. Siempre es posible "explicar" cualquier hecho conocido mediante la confección de una teoría a su medida. Tales explicaciones abundan entre los creyentes en OVNIS y otros fenómenos paranormales, y tienen la misma validez en física que las *Just So Stories* de Kipling en biología. Si las teorías convencionales no pueden explicar un fenómeno dado, entonces, por supuesto, pueden resultar necesarias ideas poco convencionales. Hasta ese momento, seguiremos fieles a la Regla 1.

Del mismo modo que no vemos razón alguna para suponer que en el Universo primitivo se desarrollaran procesos no habituales, no hay razón para postular unas condiciones iniciales especiales para el Big Bang. Por ejemplo, vimos que durante la era de las partículas los electrones y los positrones se aniquilaron mutuamente hasta que sólo quedaron electrones. Una forma de explicarlo sería suponer que había más electrones que positrones en el momento de la creación. Pero esto no es ninguna explicación en absoluto: simplemente supone lo que se quiere probar. Por lo tanto, en lugar de establecer alguna hipótesis arbitraria, supondremos que en la creación había igual número de positrones y de electrones, y

buscaremos en las leyes de la física la explicación de por qué llegó a haber después más cantidad de unos que de otros.

De ese modo llegamos a nuestra segunda regla.

Regla II: No se puede postular ningún tipo de condiciones especiales para la creación.

Esta regla desempeñará un papel importante en nuestra discusión sobre los problemas de la teoría del Big Bang en el capítulo siguiente.

El resto del libro estará dedicado a mostrar cómo podemos utilizar las teorías desarrolladas recientemente sobre las partículas elementales para reconstruir el Big Bang hasta un tiempo de 10^{-45} segundes después de la creación. Este desarrollo tendrá lugar por entero dentro del contexto de nuestras dos reglas.

AVANCE DE LO QUE VEREMOS

Podemos hacernos una idea de lo que encontraremos al ir más allá de la era de las partículas si reflexionamos sobre lo que hemos descubierto hasta ahora. En cada transición, tuvimos que comprender dos cosas, la estructura de las formas dominantes de la materia y las fuerzas que las mantienen cohesionadas. Sería imposible comprender la transición de los 500.000 años, por ejemplo, si no supiéramos que los átomos están constituidos por electrones y núcleos. De forma similar, a menos que comprendamos la fuerza eléctrica que mantiene los electrones en su órbita, no podemos saber cuánto tiene que subir la temperatura antes de que las colisiones arranquen los electrones de los átomos. Por lo tanto, una comprensión completa de cualquier otra transición en el Universo primitivo requiere que estudiemos la estructura de las partículas elementales y las fuerzas fundamentales de la naturaleza. El objeto de la segunda sección de este libro será precisamente la descripción de las nuevas teorías sobre estos temas.

Mientras tanto, para excitar la curiosidad del lector y darle ánimos para cruzar la frontera de la física de las partículas, la tabla de la página siguiente es un resumen de lo que hemos abarcado hasta ahora y una ojeada a lo que vendrá. Algunos de los términos pueden parecer de momento extraños o poco familiares, pero al acabar el libro, la tabla resultará clara y comprensible.

Edad del Universo	**Transición**	**Nombre de la era que sigue a la transición**
500.000 años	Plasma a átomos	Actual (átomos)
3 minutos	Formación de núcleos	Plasma y núcleos
0,001 segundos (1 milisegundo)	Formación de partículas a partir de quarks	Partículas
10^{-10} segundos	Unificación de las fuerzas débil y electromagnética	Quarks
10^{-35} segundos	Unificación de las fuerzas electrodébil y fuerte	Electrodébil
10^{-43} segundos	Unificación de todas las fuerzas	GUT
?	Quarks y bosones se vuelven intercambiables	Simplicidad última, supersimetría
0	Vacío de materia (?)	Big Bang

Habría que aclarar un punto sobre la terminología empleada en la tabla antes de continuar. He estado usando el término *milisegundo* de una forma algo imprecisa para referirme al momento en que empieza la era de las partículas. En realidad, el tiempo exacto en que esto ocurre es objeto de debate, como veremos en el capítulo 9. Sabemos que la era de las partículas no había empezado cuando el Universo tenía una edad de un microsegundo (10^{-6} segundos) y estaba bien establecida a la edad de un milisegundo. Las mejores estimaciones actuales sitúan su principio en algún punto entre 0,01 y 0,001 milisegundos (es decir, entre 10^{-4} y 10^{-5} segundos). En lugar de citar este rango de valores cada vez que quiera hablar del principio de la era de las partículas, usaré los términos *milisegundos o primer milisegundo* de forma amplia para referirme al instante algo mal definido en que ocurrió este proceso en el Universo primitivo.

III. LOS PROBLEMAS DE LA TEORÍA DEL BIG BANG

Las rosas tienen espinas y *las fuentes de plata, lodo...*
y *la úlcera nauseabunda crece dulcemente.*

WILLIAM SHAKESPEARE
"Soneto XXXV"

Ninguna teoría científica es perfecta. En todas hay una pequeña área de incertidumbre, algún problema que no ha sido resuelto. Si no fuera así, casi no valdría la pena hacer ciencia. Los problemas no resueltos son los focos de investigación y a menudo adquieren, para el científico, una importancia que va mucho más allá del interés intrínseco que puedan tener. La teoría del Big Bang no es ninguna excepción a esta regla. Se ha visto en dificultades para explicar algunos aspectos del estado actual del Universo en términos de las reglas básicas establecidas en el capítulo 2. Cuatro de estos problemas pueden considerarse fundamentales, en el sentido que implican cuestiones acerca de los procesos básicos que tienen lugar en la evolución del Universo.

EL PROBLEMA DE LA ANTIMATERIA

En 1932, Carl Anderson, que, en aquel tiempo, era un joven miembro de una facultad del California Institute of Technology, descubrió un nuevo tipo de partícula en un aparato que utilizaba para estudiar los rayos cósmicos. Esta partícula, bautizada con el nombre de positrón, tiene la misma masa que el electrón, pero en lugar de carga eléctrica negativa, la tiene positiva. Fue el primer ejemplo de antimateria que se vio en el laboratorio. Por su descubrimiento, Anderson fue galardonado con el premio Nobel de física de 1936, y pasó a ser el único

hombre que ha recibido el premio Nobel antes de ser profesor permanente de su Universidad.

Ya hemos mencionado algunas de las propiedades más importantes de la antimateria. Sabemos que se produce su aniquilación cuando entra en contacto con materia ordinaria, y que puede crearse en interacciones energéticas entre partículas elementales. Si tenemos un conjunto de partículas y antipartículas a una temperatura muy alta, cabría esperar que se estableciera un equilibrio entre estos dos procesos: cada vez que un par se aniquilara en un punto, se crearía otro par en una colisión distinta en cualquier otro punto. Sin embargo, al disminuir la temperatura, tiene que llegar a un punto en el que ya no puede proseguir el proceso de creación, puesto que no hay suficiente energía para producir la masa del par de partículas. En este punto, desaparece el equilibrio, y sólo prosigue el proceso de aniquilación. Cada vez que una partícula se encuentra con una antipartícula, el par desaparece y no es reemplazado. Esto sigue así hasta que deja de haber posibilidades de aniquilación porque se han consumido todas las partículas (o todas las antipartículas).

Tomemos como ejemplo una mezcla de electrones y positrones. Supongamos que cuando la temperatura desciende por debajo del punto donde es posible la creación, hay 1.000 electrones y 500 positrones. Como es natural, tendrán lugar encuentros al azar entre electrones y positrones, y cada encuentro provocará la desaparición de un par del sistema. Al final, todos los 500 positrones, con sus correspondientes electrones, se habrán convertido en fotones y el sistema sólo contendrá los 500 electrones restantes y radiación. En este punto, ya no será posible ninguna aniquilación más, por la simple razón de que ya no quedan más positrones para ser aniquilados. Por lo tanto, la composición final del sistema dependerá del número neto de partículas (el número de partículas menos el número de antipartículas) en el momento en que cese la creación de pares.

Dado que para cada partícula existe la correspondiente antipartícula, los procesos de creación y aniquilación que hemos descrito para el par electrón-positrón pueden ocurrir también

en el caso de otros tipos de partículas. Por ejemplo, existe un antiprotón, que tiene la misma masa que el protón pero una carga eléctrica negativa (en lugar de positiva). Los pares protón-antiprotón pueden ser creados por fotones de alta energía, y cuando un protón entra en contacto con un antiprotón, el par se aniquila. Sin embargo, dado que la masa del protón es 1.836 veces la del electrón, la temperatura del Universo tiene que ser muchísimo más alta para permitir la creación de pares protón-antiprotón que para el mismo proceso con los pares electrón-positrón. Por lo tanto, al enfriarse el Universo, la temperatura descenderá por debajo del punto en que pueden crearse pares protón-antiprotón mucho antes de que alcance el punto correspondiente para los electrones. Por lo tanto, habrá una secuencia de aniquilaciones desequilibradas, correspondientes a cada uno de los tipos de pares partícula-antipartícula que pueden producirse. La última gran aniquilación, la correspondiente a los electrones y positrones, tuvo lugar unos 13 minutos (de tiempo real) después del Big Bang.

Sin embargo, estos detalles del comportamiento de la materia y la antimateria en el Universo primitivo no son ni con mucho tan importantes como lo es un hecho crucial: después del comienzo de la era de las partículas, no existe ningún proceso conocido que pueda cambiar el número neto de partículas del mundo. Tanto la aniquilación como la creación afectan a pares de partículas y, por cada partícula que se crea o destruye, también tiene lugar el proceso correspondiente para una antipartícula. Así, cuando el Universo tiene una edad de un milisegundo, queda fijado para siempre el equilibrio entre materia y antimateria. Todo lo que puede suceder después de este instante es que el drama de la aniquilación siga su curso tal como hemos descrito.

Uno de los hechos sorprendentes del entorno terrestre es la notable escasez de la antimateria. Puede crearse pequeñas cantidades de ella en laboratorios especializados, pero toda la antimateria creada en la historia de la ciencia no llenaría un dedal. Nuestros satélites y sondas interplanetarias han aterrizado o han pasado cerca de los cuerpos más importantes de nuestro sistema solar y han traído el mismo veredicto: no hay

antimateria. El hecho de que los módulos de aterrizaje del Viking no explotaran cuando tocaron la superficie de Marte es una prueba positiva de que Marte está hecho de materia.

Aunque todavía no podemos mandar sondas a gran distancia fuera del Sistema Solar, podemos, sin embargo, tomar muestras del material de nuestra galaxia mediante el examen de los rayos cósmicos. Estos rayos son partículas generadas en estrellas lejanas, aceleradas y lanzadas a través del espacio, y que podemos identificar cuando por casualidad entran en el contador de algún laboratorio terrestre. La mayor parte de los rayos cósmicos son protones o núcleos de átomos ligeros. Los que se mueven menos deprisa se originan en el Sol, pero la variedad más energética procede de otras partes de la galaxia. Una pequeña fracción de los rayos cósmicos se mueve a una velocidad tan alta que podrían escaparse de nuestra propia galaxia, y suponemos que por lo menos algunas de estas partículas extremadamente energéticas pueden haber escapado de galaxias lejanas y viajado hasta la nuestra. Por lo tanto, aunque estemos temporalmente encerrados en la vecindad de nuestro espacio, recibimos constantemente visitantes del exterior. Mediante el estudio de estos visitantes, podemos aprender algo de la región de donde proceden. En lo que respecta a la cuestión de la materia y la antimateria, estos estudios dan un resultado sin ninguna ambigüedad: nuestra galaxia y, muy probablemente, todas las galaxias de nuestra región, están compuestas de materia. Por lo tanto, la Tierra es un ejemplo bastante típico de los grandes cuerpos del espacio. Sólo existe materia en ella, con una ínfima cantidad de antimateria creada en procesos de colisión naturales o artificiales. La cuestión de cómo explicar esta aparente falta de equilibrio en la naturaleza se conoce como problema de la antimateria.

El problema de la antimateria sólo puede resolverse de dos formas: o había una preponderancia de la materia sobre la antimateria cuando el Big Bang entró en la era de las partículas, o bien la antimateria de la galaxia se ha segregado de alguna manera de la materia y algunas de las galaxias más lejanas son, de hecho, antigalaxias. Si realmente había un desequilibrio en el punto de 1 milisegundo, hay dos formas en

que esto podía haber sucedido: o el Universo empezó con más materia que antimateria, o hay algún proceso en el período anterior al principio de la era de las partículas que produjo más materia que antimateria. Vamos a examinar estas posibilidades.

La antimateria ha quedado segregada

Esta idea, propuesta por vez primera por el premio Nobel sueco Hannes Alfvén, fue muy popular durante los años sesenta y principios de los setenta. Su versión más popular era así: Al principio de la era de las partículas, el Universo estaba realmente compuesto por partes iguales de materia y antimateria, pero la mezcla no era uniforme. Era más parecida a una ensalada revuelta que a un batido de leche, con algunas partes que contenían más materia que antimateria y otras que contenían justo lo contrario. En cada región por separado, el proceso de aniquilación eliminó las partículas minoritarias y produjo una región donde todo era materia o todo antimateria. En los lindes entre regiones diferentes, tuvo lugar un proceso físico bien conocido. Las partículas y las antipartículas que chocaban entre sí en los lindes de las regiones se aniquilaban, y producían un flujo de rayos gamma y X. Esta radiación barría literalmente la materia restante y la alejaba de las regiones colindantes, e impedía así que la aniquilación fuera más rápida. Ocurre un fenómeno similar cuando se dejan caer gotas de agua sobre una sartén caliente. En este caso, la evaporación del agua en la parte inferior de la gota crea una capa de vapor, llamada capa de Leidenfrost, que aísla el resto de la gota de la plancha caliente. De esta forma, la gota dura mucho más tiempo de lo que cabría esperar. Sucede algo parecido cuando un faquir indio camina sobre carbones encendidos, sólo que, en este caso, la transpiración es la que crea la capa de Leidenfrost. En el Universo primitivo, cabría suponer la formación de una capa de Leidenfrost entre las regiones de materia y las de antimateria, que retrasara la aniquilación final de las dos regiones.

Hasta hace poco, no pudo refutarse esta hipótesis, dado que los rayos gamma emitidos en el proceso de aniquilación

son absorbidos por la atmósfera y no podían ser detectados por telescopios situados en la superficie terrestre. Sin embargo, con el advenimiento de la astronomía de rayos X mediante cohetes y satélites, pudo superarse esta limitación. Las observaciones realizadas por encima de la atmósfera han identificado, en efecto, muchas fuentes de rayos X en el cielo, pero ninguna de estas fuentes corresponde al tipo de lindes extensos que cabría esperar de una capa de Leidenfrost. Con esto se llega a la conclusión de que nuestra propia galaxia y nuestro cúmulo de galaxias están compuestos por entero de materia. Por supuesto, no podemos excluir la posibilidad de que otros cúmulos de galaxias puedan ser de antimateria, pero una situación como ésta requeriría que el agolpamiento inicial de la materia y la antimateria fuera muy grande; sería como remover una ensalada y encontrar todos los tomates de un lado de la fuente y la lechuga en el otro lado. Aunque no podemos probar que no haya regiones de antimateria en algún lugar del Universo, no existe ningún tipo de evidencia que nos sugiera que las haya. A la vista de este resultado, ha disminuido de manera considerable, en los últimos años, el interés por esta solución particular del problema de la antimateria.

El Big Bang empezó con más materia que antimateria

Esta solución tampoco puede descartarse, ya que es imposible retroceder en el tiempo y ver el Big Bang. Tal vez, si no podemos encontrar otra solución, tengamos que adoptar finalmente ésta, pero constituye una violación de la Regla 2. Además, hay cierta inconveniencia inherente en el hecho de dar por sentado algo que tendría que demostrarse, ya que nos lleva simplemente a la siguiente pregunta obvia: ¿Por qué el Universo habría empezado de esta forma? Para un físico, el único número neto de partículas que no necesita explicación es cero.

El responsable es algún proceso previo a la era de las partículas

Los avances de la astronomía y nuestros propios prejuicios filosóficos nos dejan esta posibilidad como la única for-

ma de abordar el problema de la antimateria. Esto significa que si queremos solucionar esta dificultad, nos vemos forzados a explorar las etapas por las que el Universo pasó antes de tener un milisegundo de edad. Al hacerlo, nos encontramos con un obstáculo importante. Desde el descubrimiento de la antimateria, los físicos han creído que las leyes de la naturaleza son completamente simétricas en lo que se refiere a la distinción entre partículas y antipartículas. Tendremos que explicar, por lo tanto, cómo un conjunto de leyes que operan en un universo cuyo número neto de partículas es cero puede llegar a producir un universo en el que predomina la materia, y la antimateria es prácticamente inexistente.

EL PROBLEMA DE LA FORMACIÓN DE LAS GALAXIAS

Ya hemos aludido al hecho de que el proceso por el que se formaron las galaxias está conectado íntimamente con la formación de los átomos unos 500.000 años después del Big Bang. Antes de este tiempo, la materia del Universo se encontraba en forma de plasma, con electrones libres y núcleos que se movían con independencia unos de otros. Entremezclado en este conjunto de partículas cargadas, había un mar muy caliente de radiación en forma de fotones.

Cuando un fotón se encuentra con una carga eléctrica libre como el electrón, tiene lugar una interacción violenta. El fotón y la partícula rebotan, proceso que los físicos llaman dispersión. Este proceso puede imaginarse como algo análogo a la colisión de dos bolas de billar a gran velocidad. Ambas rebotan y salen despedidas desde el punto de la interacción en direcciones distintas de las iniciales que les llevaron hacia aquél.

Las colisiones continuas entre fotones y partículas en el plasma primitivo creaban una presión que impedía que la materia se agregara en fragmentos de tamaño galáctico. La mejor forma de imaginarse esta presión es considerar un neumático corriente de automóvil. Las moléculas de aire situadas dentro del neumático colisionan con éste y rebotan.

Cada una de estas colisiones produce una pequeña fuerza, que se ejerce sobre la goma, y la suma de todas las fuerzas ejercidas por todas las moléculas, que llamamos presión del neumático, lo mantiene hinchado. El punto crucial es que existe presión porque las moléculas rebotan cuando se encuentran con la superficie del neumático. En el lenguaje que estamos usando, un neumático se mantiene hinchado porque sus paredes de caucho son muy eficientes en la dispersión de las moléculas de aire.

Es evidente que, si reemplazáramos el neumático de caucho por algo que no fuera un dispersador tan eficiente —muselina, por ejemplo— no se ejercería presión sobre la pared. Las moléculas que alcanzaran el límite pasarían a través de él sin dispersarse, y el neumático se deshincharía. Ahora bien, los átomos en los que el Universo se congeló a los 500.000 años, son unos dispersadores bastante ineficaces de la radiación. El lector puede convencerse de este hecho si considera que no es raro alcanzar a ver a cientos de kilómetros en un día claro. (Puedo recordar, por ejemplo, haber estado en Los Álamos en una noche típica de Nuevo México y ver las luces de Albuquerque a una distancia de 150 kilómetros.) Esto significa que la luz puede viajar a gran distancia entre los átomos de nuestra atmósfera sin experimentar una distorsión muy importante.

En lo que concierne al Universo primitivo, tan pronto como se formaron los átomos, la radiación dejó de ser dispersada fuertemente por la materia. Esto tuvo dos consecuencias inmediatas: 1) la radiación quedó libre para expandirse sin interferencias (el fondo de microondas es el resultado de esta expansión) y 2) la radiación dejó de ejercer presión sobre la materia. Por lo tanto, al cabo de 500.000 años, la materia pudo aglutinarse y formar las galaxias que hoy dominan el Universo.

El proceso mediante el cual esto pudo ocurrir es fácil de describir. Supongamos que la materia del Universo estuviera esparcida de manera uniforme después de 500.000 años. El movimiento atómico normal garantiza que más tarde o más temprano dos átomos se acerquen uno a otro más de lo nor-

mal. Cuando esto suceda, ambos ejercerán una fuerza gravitatoria algo más fuerte de la normal sobre los átomos vecinos y añadirán estos nuevos átomos a la colección. El resultado es que se reunirán aún más átomos en el punto inicial, con lo que se ejercerá una atracción gravitatoria aún más fuerte sobre los vecinos. Es evidente que el proceso seguirá acumulando cada vez más materia alrededor del punto original, hasta agotar toda la materia disponible. Cabe suponer incluso que un universo completamente uniforme quedaría segregado por último en porciones discretas de materia, y estas porciones son las que identificamos con las galaxias.

El problema de esta imagen sencilla de la formación de las galaxias no es que no ocurra el proceso que hemos descrito, sino que un conjunto de unos pocos átomos tarda demasiado en reunir una masa galáctica. El punto importante es que el proceso de agregación tiene lugar en un universo que está experimentando una rápida expansión. Si los agregados de materia no alcanzan un tamaño crítico con rapidez, la expansión universal se habrá llevado el resto de materia fuera de su alcance antes de que se haya acumulado una masa suficiente para formar una galaxia. Los astrónomos saben que el tiempo que requieren los movimientos atómicos al azar para producir un agregado de tamaño galáctico es bastante largo. Si éste fuera el único proceso factible de ocurrir, no habría ninguna galaxia en el cielo. El problema esencial es que la parte inicial del proceso —la construcción de un fragmento apreciable de materia a partir de unos pocos átomos— es muy lenta. Parece, por tanto, que el Universo no pudo haber entrado en la era de los átomos con una distribución uniforme de materia.

Pero esto no es demasiado sorprendente, ya que es normal esperar que algo tan caótico como el Big Bang produzca una nube de gas en expansión muy turbulenta. En el plasma existirían remolinos y contracorrientes, que corresponderían a concentraciones de masa listas para empezar el proceso de acumulación. Esta idea fue bastante popular durante un tiempo, pero numerosos cálculos mostraron que incluso empezando con una turbulencia normal en el plasma, la atracción gravitatoria es aún demasiado baja para que se formen las

galaxias. Por consiguiente, durante casi una década, la cuestión de cómo se ha llegado a formar la estructura a gran escala de la galaxia ha sido uno de los mayores problemas no resueltos de la cosmología.

Puesto que las soluciones sencillas parecen no funcionar, sólo hay dos caminos posibles. O bien el Universo fue creado con la materia ya agrupada en agregados que llegaron a formar las galaxias, o hay algún proceso todavía desconocido que formaría estos agregados antes de la formación de los átomos. La primera opción es una violación directa de nuestras reglas y por lo tanto se evitará mientras sea posible. La segunda opción parece más atractiva, pero sabemos que no hay ningún proceso (aparte de la turbulencia) que pudiera producir el agrupamiento necesario de la materia durante las eras de las partículas o de los núcleos. Igual que en el caso del problema de la antimateria, nos vemos obligados a investigar el período anterior a 1 milisegundo para explicar la existencia de las galaxias.

EL PROBLEMA DEL HORIZONTE

La radiación de fondo de microondas juega un papel importante en nuestro conocimiento de la estructura primitiva del Universo, tal como ya hemos visto. Hay un planteamiento de esta radiación que, aunque de un modo superficial parece muy razonable, lleva a dificultades si se sigue. Cuando se realizan observaciones en la alta atmósfera mediante detectores de microondas en globos y aviones, se encuentra que la radiación es isótropa con una precisión superior al 0,01%. Esto significa que si medimos los fotones procedentes de una dirección del cielo y entonces damos un giro de 180° y repetimos la operación, encontraremos que los dos conjuntos de fotones son idénticos con la precisión mencionada.

A primera vista, parece ser lo que deberíamos esperar si nos basamos en nuestra intuición. ¿Por qué una porción de cielo iba a ser distinta de otra? Pero si tenemos en cuenta el origen de la radiación de 3°K, recordaremos que lo que ob-

servamos ahora depende de la temperatura de la región del espacio desde la que se emitió la radiación 500.000 años después del Big Bang. El problema es que la radiación que está llegando ahora a nuestros detectores desde extremos opuestos del Universo, fue emitida por secciones del plasma en congelación que estaban a más de 500.000 años luz de distancia. Si esto es cierto, ¿cómo pudo suceder que ambas regiones estuvieran exactamente a la misma temperatura?

Para comprender por qué una situación como ésta produce quebraderos de cabeza a los físicos, vamos a considerar una sencilla analogía. Supongamos que tenemos una bañera llena de agua de tal forma que toda el agua a la derecha de una cierta línea está caliente y toda el agua a la izquierda está fría. Todos sabemos lo que sucederá en esta situación. Si esperamos un tiempo suficiente, toda el agua de la bañera se pondrá tibia, a la misma temperatura. En la jerga de los físicos, decimos que el agua de la bañera "llega al equilibrio térmico".

¿Cuánto tardará en completarse el proceso? Dependerá en cierta medida, como es natural, de las temperaturas implicadas, pero la experiencia nos dice que, en la mayoría de los casos, será suficiente una media hora. Pero, supongamos que hacemos otra pregunta. Supongamos que queremos conocer el tiempo mínimo posible, en principio, que el agua tardará en alcanzar el equilibrio.

Sabemos que hay una correlación entre la temperatura del agua y el movimiento de las moléculas que la constituyen: cuanto mayor es la velocidad molecular, más alta es la temperatura. En el movimiento hacia el equilibrio térmico, las moléculas rápidas del agua caliente se frenan al colisionar con las del agua fría. Como es evidente, no se puede establecer el equilibrio térmico en un tiempo más corto que el necesario para que una molécula se mueva de la región caliente de la bañera a la fría. El proceso real de repartir la energía entre las moléculas de agua puede tardar en realidad muchísimo más que esto, pero sin duda no puede tardar menos. Para utilizar otra muestra de jerga física, decimos que el proceso de alcanzar el equilibrio térmico, no puede tener lugar a menos que las dos regiones cuyas temperaturas se trata de equilibrar puedan

"comunicarse" entre sí. En términos antropomórficos, puede imaginarse que el equilibrio térmico depende de que un mensajero vaya de una región a la otra y diga: «Ésta es la temperatura que hay allí.»

En una bañera la comunicación entre las regiones diferentes se realiza a través del movimiento de las moléculas. En el Universo primitivo tenía lugar a través de la luz y las partículas. Sabemos por la teoría de la relatividad que no se puede transmitir información de una región a otra a una velocidad mayor que la de la luz. Por lo tanto, cuando observamos la isotropía de la radiación de microondas y concluimos que fue emitida desde regiones con una temperatura común, decimos, de hecho, que el Universo estaba en equilibrio térmico 500.000 años después del Big Bang. Esto implica que todas las partes del Universo tienen que haber estado en comunicación entre sí antes de este instante.

Y esto nos acarrea un problema. Si regresamos a nuestra analogía del Universo y del globo, en las que representábamos las galaxias como puntos en la superficie del globo, la luz emitida por una galaxia dada podría representarse mediante un grupo de hormigas que se movieran en un círculo que se ensanchara sin cesar, centrado en esa galaxia. Todas las galaxias dentro de este círculo habrían recibido luz de la galaxia central y, a la inversa, podrían ser vistas por un observador situado en ella. Una galaxia que en cualquier momento se encontrara aún fuera del círculo de hormigas, no sería visible para el observador, porque la luz no habría tenido todavía tiempo de llegar hasta él desde esta fuente particular. El círculo de hormigas en movimiento hacia fuera representa el horizonte del observador: éste puede ver cualquier cosa dentro del horizonte, pero nada fuera de él. El momento justo en que un punto particular entra dentro de nuestro horizonte depende de la velocidad del movimiento de las hormigas y de la velocidad de expansión del globo.

Si consideramos ahora la emisión de la radiación de microondas a los 500.000 años, resulta que la radiación emitida desde puntos opuestos del cielo procede de regiones que, en aquel momento, estaban fuera del respectivo horizonte unas

de otras. En otras palabras, no había forma de que estas regiones se hubieran comunicado entre sí y hubieran establecido el equilibrio térmico. Entonces, ¿cómo pueden haber alcanzado la misma temperatura con una precisión de 0,01%? Esto se conoce como el problema del horizonte.

¿Cuáles son las posibles soluciones? Igual que para los otros problemas que hemos discutido, una vez se ha entrado en la era de las partículas, no conocemos ninguna manera de encontrar una solución. Si el Universo no está en equilibrio térmico en ese momento, ya no lo estará nunca. Además, la expansión del Universo durante el primer milisegundo era tan rápida que puede argumentarse que nunca existió un momento en el que pudiera haberse establecido una comunicación entre todo el Universo.

Por lo tanto, nos quedan dos posibilidades. O bien el Universo se creó en equilibrio térmico, o bien algún proceso antes de la era de las partículas nos impide hacer el tipo de ingenua extrapolación que conduce a la paradoja. La primera posibilidad es equivalente a suponer que toda el agua de la bañera estaba tibia al empezar, suposición que viola nuestras reglas.

La alternativa, una vez más, nos exige investigar más de cerca lo que precedió a la era de las partículas y esperar que algunos descubrimientos nuevos resuelvan el problema.

EL PROBLEMA DEL UNIVERSO PLANO

Una vez tenemos en mente la imagen del Universo en expansión, podemos hacer una sencilla pregunta: ¿Continuará para siempre la expansión o se invertirá algún día y se producirá un período de contracción universal? La respuesta a esta pregunta depende de la cantidad de masa del Universo. Si hay suficiente masa, la fuerza de gravedad, que ejerce el Universo será suficiente para frenar y, por último, detener las galaxias en recesión. Si no hay suficiente masa, esto no sucederá nunca. Se produce una situación exactamente análoga cuando lanzamos una pelota hacia arriba desde la superficie terrestre.

Puesto que la Tierra es muy masiva y ejerce una fuerte atracción gravitatoria, la pelota disminuirá la velocidad, se parará, invertirá su movimiento y caerá de nuevo al suelo. La misma pelota, lanzada desde la superficie de un asteroide, navegaría por el espacio ya que la masa del asteroide sería insuficiente para detenerla.

La cuestión de si el Universo continuará su expansión o se contraerá algún día —la cuestión de si es “abierto” o “cerrado”, para usar términos cosmológicos— parece sencilla. Todo lo que tenemos que hacer es sumar toda la masa del Universo, calcular la atracción gravitatoria sobre las galaxias en recesión y ver si es suficiente para detener esta recesión. Esta receta, sencilla en principio, es difícil de llevar a cabo porque toda la materia del Universo no es necesariamente visible para nosotros. Discutiremos este hecho con detalle en el capítulo 14, cuando consideremos el destino final del Universo. Por el momento, sin embargo, señalemos que las observaciones indican que la cantidad de materia del Universo es sin duda mayor que una décima parte y menor que diez veces la cantidad crítica requerida para detener la expansión.

En otras palabras, el Universo es apenas abierto o apenas cerrado. En el lenguaje de la cosmología, decimos que el Universo es “casi plano”; un universo plano es aquel en que hay la masa justa para detener la expansión. El problema es que dadas las infinitas masas posibles que podría tener el Universo, ¿por qué tiene una masa tan cercana a este valor crítico? ¿Por qué el Universo es casi plano?

El lector ya se habrá dado cuenta de que la Regla 2 juega un papel importante en nuestros razonamientos sobre el Universo primitivo. El disgusto que sienten los científicos cuando se ven forzados a suponer aquello que está por probar es una importante fuerza motivadora de la investigación. Pero hay un aspecto de la regla, una hipótesis oculta, que debe ser explorada.

Cuando decimos que algo “debería" ser probado o “tendría que ser” explicable sin hipótesis iniciales estamos, de hecho, haciendo un juicio acerca del estado de los conocimientos científicos en el momento en que se pronunciaron

estas palabras. Nos molesta vemos obligados a hacer suposiciones especiales acerca de la creación del Universo sólo si tenemos la sensación de conocer lo suficiente de los procesos que intervienen para explicar los hechos sin ninguna suposición. Por ejemplo, hemos estudiado la antimateria en nuestros laboratorios durante más de medio siglo y tenemos la idea de que sabemos lo que hay que saber de ella. La existencia del problema de la antimateria contradice esta creencia; por lo tanto deseamos dedicar un gran esfuerzo para resolverlo. Los tres problemas de que hemos hablado hasta ahora son de este tipo. Para mayor claridad, a los problemas que no están resueltos en la actualidad pero que tendrían que ser resolubles con nuestros conocimientos actuales los llamaremos problemas de la primera clase.

Hay otras clases de problemas en cosmología que no se ajustan a esta definición. Por ejemplo, si preguntáramos por qué la carga del electrón tiene el valor que tiene y no algún otro valor, nadie podría dar una respuesta satisfactoria. Éste es un problema genuinamente no resuelto, pero los científicos no culparían a una teoría por no ser capaz de solucionarlo. Todo el mundo reconoce que una cuestión como ésta requiere un conocimiento mucho más profundo de la física del que tenemos en la actualidad y es improbable que ninguna teoría en un futuro inmediato tenga algo que decir sobre la carga del electrón. Por eso, mientras consideramos la incapacidad de resolver los problemas de la antimateria, de la formación de las galaxias y del horizonte como un fallo grave de cualquier teoría cosmológica, no ponemos el problema de la carga del electrón en la misma categoría. Los problemas de este tipo, que se considera en general que requieren una comprensión mucho más profunda del mundo de la que ahora poseemos, los llamaremos problemas de la segunda clase.

El llamado problema del Universo plano es en realidad un problema de la segunda clase que tradicionalmente se mezcla con problemas de la primera clase en las discusiones sobre el Big Bang. Sin embargo, debe recordarse que es cualitativamente distinto de las otras cuestiones suscitadas en este capítulo. Puedo imaginarme que un científico deje de creer en la

teoría del Big Bang si el problema de la antimateria continuara sin solución. No puedo imaginar que haga lo mismo a causa del problema del Universo plano.

Parece, por tanto, que la masa total del Universo es una de esas cantidades, como el valor preciso de la carga eléctrica, cuya explicación debe esperar la aparición de una teoría más fundamental que las que ahora están disponibles. Sin embargo, si de la exploración del primer milisegundo de vida del Universo se obtuviera una solución a este problema, tendríamos el derecho de considerar esta solución como un premio inesperado y de utilizar su existencia como un fuerte argumento en favor de nuestro análisis.

SUMARIO

Hay cuatro problemas fundamentales asociados con nuestro modelo del Big Bang. Tres de ellos son problemas de la primera clase y debería considerarse la imposibilidad de resolverlos como evidencia de un fallo importante en nuestra comprensión del proceso. Estos problemas son: 1) por qué hay tan poca antimateria en el Universo; 2) cómo pueden haberse formado las galaxias en el tiempo asignado a este proceso, y 3) por qué el Universo es isótropo. Además, hay un problema de la segunda clase que se asocia tradicionalmente con los tres problemas de la primera clase: por qué la masa del Universo está tan cerca del valor crítico necesario para cerrarlo.

Hemos visto que si queremos evitar la elaboración de suposiciones especiales acerca del momento de la creación para resolver estos problemas, tenemos que explorar el período de tiempo antes del principio de la era de las partículas, el primer milisegundo de existencia. En la segunda parte de este libro presentamos una discusión de las teorías que nos permitirán hacerlo.

SEGUNDA PARTE

La investigación del primer milisegundo de existencia requiere una cierta comprensión de los procesos que dominan el comportamiento de la materia a energías muy altas. Los capítulos 4 al 8 describen nuestro conocimiento actual en este campo, incorporado en las llamadas teorías unificadas. Teniendo en cuenta la posibilidad de que no todos los lectores deseen seguir con detalle los argumentos que están implicados en el establecimiento de estas teorías, hemos proporcionado una “vía rápida" para esta parte del libro. Al final de cada capítulo, en un tipo de letra distinto, hay un sumario de los resultados principales. El lector que esté interesado en pasar a la descripción del Universo primitivo, puede leer estos resúmenes e ir directamente al capítulo 9, mientras que el lector que desee adquirir una comprensión más profunda de cómo surgieron las ideas de los sumarios, puede seguir los capítulos 4 al 8 con más detalle.

IV. PARTÍCULAS ELEMENTALES Y QUARKS

Raramente las cosas son lo que parecen.

W. S. GILBERT Y ARTHUR SULLIVAN
HMS Pinafore

EL CONCEPTO DE PARTÍCULA ELEMENTAL

Hay una larga tradición en el pensamiento occidental en el sentido de considerar que para comprender algo por completo hay que desmontarlo y ver cómo está hecho. La frase *ver qué lo hace funcionar,* con sus implicaciones de realizar una operación de este tipo y encontrar los engranajes y las ruedas internas que hacen que algo funcione, es una manifestación familiar en esta línea de pensamiento. A lo largo de casi dos siglos, los científicos que han tratado de descubrir la naturaleza de la materia han revelado capas sucesivas de "realidad", en un intento de encontrar una partícula verdaderamente elemental, una porción de materia que explique cómo funciona el mundo. El propósito de este empeño es explicar todo el mundo material a partir de distintas disposiciones de unas pocas entidades básicas. De la misma manera, se podría tratar de explicar la arquitectura mediante el descubrimiento de unos pocos elementos básicos (ladrillos y vigas, p. ej.) y que todos los edificios, por complejos que sean, son el resultado de combinaciones distintas de estas partes básicas.

A principios del siglo XIX, el químico británico John Dalton propuso que el bloque elemental constitutivo de la materia era el átomo (literalmente, "aquello que no se puede dividir"). La infinidad de sustancias químicas que se iban conociendo por entonces eran simplemente disposiciones diferentes de unos pocos tipos distintos de átomos. A principios del siglo XX nuestro conocimiento penetró otro nivel más profundo, cuando Ernest Rutherford descubrió que el átomo, lejos de ser

indivisible, tenía una estructura muy definida, en la que unos electrones de carga negativa rodeaban un núcleo de carga positiva, de manera parecida a como los planetas rodean el Sol. Por un momento, pareció que se vislumbraba la solución final, un mundo en el que todas las cosas eran alguna combinación de protones, neutrones y electrones. Los protones, con una carga positiva, y los neutrones, eléctricamente neutros, se unen en cantidades muy parecidas para formar los núcleos que, junto con los electrones en sus órbitas, forman los átomos.

Por desgracia, este dulce sueño de simplicidad no llegó a realizarse. Los científicos empezaron a investigar el núcleo haciendo que haces de protones muy rápidos chocaran con él. Estos haces rápidos los proporcionaba la naturaleza en forma de rayos cósmicos, o los creaban los científicos por medio de potentes aceleradores de partículas, que se desarrollaban entonces. En los restos de estas colisiones, de hecho nuevas partículas, no se veían ni protones, ni neutrones ni electrones. Al aumentar nuestra capacidad de impartir altas energías a los proyectiles en estos experimentos, se hizo posible crear cada vez más clases diferentes de partículas en nuestros laboratorios mediante la aceleración de protones a velocidades siempre más elevadas y haciendo que estas partículas rápidas chocaran con un blanco estacionario. En el proceso de la colisión, parte de la energía del movimiento del protón se convertía en la masa de nuevas especies de partículas. A mediados de los años setenta, se publicó una edición especial de 246 páginas de la revista profesional *Reviews of Modem Physics* con un sumario relativamente compacto de todos los datos recogidos sobre las partículas elementales descubiertas hasta el momento.

La historia de cómo se descubrieron estas partículas y qué significan estos descubrimientos es demasiado larga para ser explicada aquí. Para nuestra exploración del Universo primitivo, sólo necesitaremos tener a nuestra disposición algunas de las propiedades que tienen en común estas partículas y un conocimiento rudimentario de los esquemas de clasificación que se han desarrollado para su tratamiento.

PROPIEDADES DE LAS PARTÍCULAS

Masa

Toda partícula tiene una masa definida, aunque a veces esta masa puede ser cero. Sabemos que la masa y la energía son intercambiables según la razón dada por la fórmula de Einstein $E = mc^2$. Por lo tanto, si las colisiones entre las partículas son lo suficientemente fuertes, puede haber, en principio, suficiente energía para crear una partícula de cualquier masa que se desee. Esta creación de masa de partículas a partir de energía es diferente del tipo de producción de partículas encontrado en algunas colisiones de átomos y núcleos, en las que la energía del proyectil arranca simplemente del blanco los constituyentes, ya existentes. En los procesos de creación, se genera una partícula donde antes no había ninguna.

Incluso la unidad que utilizan los físicos de altas energías para medir la masa de las partículas depende de esta equivalencia entre masa y energía. Las masas se miden normalmente en gigaelectronvoltios (G*e*V). Un electronvoltio (*e*V) es la energía necesaria para desplazar un único electrón a través de un potencial eléctrico de 1 voltio. Un electrón que se mueve de un polo al otro de una batería corriente de automóvil adquiere, por lo tanto, una energía de 12 *e*V. Mover diez electrones requeriría 120 *e*V, etc. El prefijo *giga* representa mil millones, o 10^9. Un gigaelectronvoltio, por lo tanto, representa la energía requerida para mover un único electrón a través de una batería de 10^9 voltios, o mil millones de electrones a través de una batería de 1 voltio. Es una unidad de energía, pero como sabemos que hay una equivalencia entre masa y energía, puede servir también como unidad de masa. Como referencia, la energía equivalente de la masa del protón es un poco menor de 1 G*e*V y las masas típicas de las partículas que se ven en los aceleradores van desde 0,005 G*e*V (el electrón) hasta unos 100 G*e*V (el bosón vectorial, una partícula que nos encontraremos más tarde). Hay algunas partículas importantes cuya masa es cero.

Spin

Pueden visualizarse algunas de las propiedades de las partículas elementales si las imaginamos como diminutas bolas de billar. Una de las cosas que puede hacer una bola de billar es girar alrededor de su propio eje, igual que hace la Tierra. Ésta es la propiedad de las partículas que llamamos spin.

Estamos acostumbrados a creer que los cuerpos grandes como la Tierra pueden girar a una velocidad cualquiera y que el período de rotación de veinticuatro horas es el resultado de un accidente histórico. En principio, la Tierra podía haber acabado girando cada veintitrés horas o incluso cada año.

Cuando tratamos con partículas a un nivel cuántico, sin embargo, deja de existir este tipo de libertad en el giro. Encontramos que una partícula elemental sólo puede girar a ciertas velocidades bien definidas. Para comprender lo que la mecánica cuántica nos dice acerca del spin de las partículas, podemos introducir el concepto de velocidad de rotación básica. Es una unidad fundamental, en términos de la cual se mide el spin real de la partícula. La mecánica cuántica nos indica la manera de calcular esta velocidad para cualquier partícula[3]. El protón, por ejemplo, tiene una velocidad de rotación básica de 10^{22} revoluciones completas por segundo.

El significado de la velocidad de rotación básica es el siguiente: las partículas sólo pueden girar a velocidades que son ciertos múltiplos bien definidos de su velocidad de rotación básica. Por ejemplo, pueden girar el doble o la mitad de rápido, pero no pueden girar a tres cuartos o dos tercios de esta velocidad. En el lenguaje de la mecánica cuántica, decimos que el spin de las partículas está cuantificado. En cierto modo, definir la velocidad de rotación básica para una partícula es como definir la unidad monetaria básica. Una vez hemos definido el dólar, podemos decir que las denominaciones de

[3] Técnicamente, la velocidad de rotación básica se calcula estableciendo el momento angular de la partícula en rotación igual a la constante de Planck Para una esfera de masa M y radio R que da una vuelta cada T segundos, esto corresponde al requerimiento de que $4\pi MR^2/5T = h$ El valor de T obtenido en esta ecuación es lo que estamos llamando velocidad de rotación básica.

las monedas están cuantificadas. Por ejemplo, hay monedas de diez centavos y de cuarto de dólar, pero no hay ninguna cuyo valor sea de treinta y un centavos.

Un objeto individual, como la Tierra o el protón, gira a una velocidad definida, que es un múltiplo de su velocidad de rotación básica. La manera sencilla de designar esta velocidad es dar el número de spin. Para la Tierra, este múltiplo es un número inmenso (del orden de 10^{61}). Para el protón este número es 1/2. En otras palabras, encontramos de manera experimental que el protón gira precisamente a la mitad de la velocidad de rotación básica que la mecánica cuántica le asigna. En la jerga de la física de las altas energías, decimos que el protón tiene un *spin 1/2, o* que es una *partícula de spin 1/2*. Las partículas que giran exactamente a la velocidad de rotación básica decimos que tienen spin 1, las que no giran tienen spin 0, etc. Cualquier partícula de las que hablamos tiene una determinada velocidad de rotación, y esta velocidad de rotación es constante en el tiempo.

Estabilidad

Con unas pocas excepciones que señalaremos de manera explícita, todas las partículas elementales son inestables. Con esto queremos decir que, si observamos la partícula, veremos que al final se desintegra y en su lugar advertiremos otras partículas más ligeras. A este proceso lo llamamos desintegración de la partícula original y a las partículas que aparecen, productos de la desintegración. Por ejemplo, un neutrón libre desaparecerá tarde o temprano, y en su lugar habrá un protón, un electrón y una partícula sin masa llamada neutrino. Estas desintegraciones pueden ser relativamente lentas, como en el caso del neutrón (que tarda más de 10 minutos en desintegrarse), o pueden ser realmente muy rápidas (algunas partículas experimentan la desintegración en un tiempo tan corto como 10^{-23} segundos). Sin embargo, la desintegración de las partículas de gran masa es un aspecto crucial del mundo subatómico, y nos proporciona un método de clasificación del sorprendente surtido de objetos elementales que han encontrado los experimentadores.

ESQUEMAS DE CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES

Dado que se han descubierto cientos de partículas y que casi todas ellas son inestables, no tiene sentido tratar de designar algunas como elementales y otras como no elementales. Incluso el protón, la más "elemental" de las partículas, puede llegar a desintegrarse si esperamos lo suficiente (posibilidad que discutiremos con detalle en el cap. 8). O bien todas las partículas son elementales en el sentido en que estamos usando el término o bien ninguna lo es. Lo mejor que podemos hacer, por lo tanto, es encontrar alguna forma de organizar y clasificar las partículas, con la esperanza de que hacerlo nos permitirá ordenar nuestras ideas sobre ellas. Para llevar a cabo esta clasificación, utilizaremos algunas de las propiedades de las partículas que acabamos de describir. Debe tenerse en cuenta, durante este ejercicio, que cualquier clasificación de las partículas que hagamos tiene una especie de imagen especular en la clasificación de las antipartículas, imagen que no vamos a elaborar para no extendernos demasiado.

Clasificación por el spin

Las partículas que tienen un spin semientero —1/2, 3/2, 5/2, etc., según la terminología introducida en la sección anterior— se llaman fermiones, en honor al físico Enrico Fermi, que fue el primero en estudiar sus propiedades. Esta categoría incluye el protón, el electrón, el neutrón y un buen número de otras partículas masivas. También incluye los neutrinos, que son las partículas sin masa que aparecen entre los productos de la desintegración del neutrón, así como en otras interacciones.

Las partículas que tienen un spin entero —0, 1, 2, etc.— se llaman bosones, en honor al físico indio S. N. Bose. El único bosón que hemos encontrado hasta ahora es el fotón, la partícula asociada con la radiación electromagnética.

Los fermiones y los bosones son dos clases realmente distintas de partículas en el sentido de que nunca se ha observa-

do ninguna interacción que convierta la una en la otra. Esta distinción, tal como veremos, persiste hasta las primeras etapas del Big Bang.

Clasificación por los productos de desintegración

Cuando se desintegra una partícula elemental, los productos de desintegración pueden comprender partículas que son estables nominalmente, como el electrón, el protón, el fotón o el neutrino, o pueden comprender partículas que a su vez se desintegran. Sin embargo, es evidente que, si esperamos un tiempo suficiente y dejamos que los productos de desintegración y los productos de los productos de desintegración se desintegren, llegaremos por último a un conjunto de partículas relativamente estables. Ahora bien, caben dos posibilidades. O este conjunto tiene un exceso de protones respecto a los antiprotones (o viceversa) o bien no lo tiene Si no lo tiene, la partícula original se llama mesón (literalmente, "la intermedia"); en caso contrario, se llama barión (literalmente "la pesada").

El término *mesón* fue acuñado en los años treinta a causa de que las únicas partículas que se conocían en aquel tiempo y que se ajustaban a nuestra definición tenían una masa intermedia entre la del electrón y la del protón. Veamos dos ejemplos importantes del mesón. El primero que se descubrió se designó con la letra griega *mu* (μ) y se llamó mesón mu o muon. Tiene una masa de 0,105 G*e*V, unas doscientas veces la masa del electrón y una novena parte de la del protón. Tiene spin ½ y se desintegra en alrededor de un microsegundo en un electrón, un neutrino y un antineutrino. Todos estos productos de desintegración son estables, y el conjunto no contiene ningún protón, por lo que la partícula es claramente un mesón.

De forma similar, a finales de los años cuarenta se descubrió un tipo de mesón que se designa con la letra griega *pi* (π) y que se denomina mesón pi o pión. Los tres miembros de la familia del mesón pi tienen cargas eléctricas positiva, negativa y neutra, respectivamente, y masas alrededor de los 0,14 G*e*V. Los dos miembros con carga de la familia se desinte-

gran en 10^{-8} segundos en un muon y un neutrino, mientras que el miembro neutro se desintegra en 10^{-16} segundos en un par de fotones. Los muones creados por la desintegración de los piones que tienen carga se desintegran a su vez, por supuesto, por lo que el conjunto de productos de desintegración de un pión de carga negativa, por ejemplo, consiste en un electrón y un conjunto de tres neutrinos. Este conjunto no contiene ningún protón, por lo que el pión satisface de manera clara nuestra definición de mesón.

En ambos ejemplos, la masa del mesón es menor que la del protón. Para estas partículas no hay suficiente energía en la masa del mesón para producir un protón entre los productos de desintegración: son mesones por defecto. Se conocen, sin embargo, muchos mesones cuya masa excede 1 G*e*V y para estas partículas podría haber, en principio, un protón entre los productos de desintegración. Por lo tanto, el hecho de que no haya ninguno nos dice algo fundamental acerca de la naturaleza de la partícula.

El término barión se aplica a una partícula cuya desintegración tiene como resultado final un protón más otras partículas estables. Es obvio que todos los bariones deben tener como mínimo la masa del protón. Aunque en las listas de partículas hay casi tantos bariones como mesones, aquí sólo describiremos uno de ellos. Éste constituye una familia de partículas que se designa con la letra delta (Δ). Esta familia tiene cuatro miembros, cuyas cargas eléctricas van desde dos unidades positivas hasta una unidad negativa y que tienen una masa cercana a 1,2 G*e*V. El delta se desintegra en unos 10^{-23} segundos en un protón o un neutrón y un pión. Por lo tanto, sus productos finales de desintegración serán un protón y una colección de electrones, positrones y neutrinos. La presencia de un protón, por supuesto, es lo que sitúa esta partícula en la categoría de los bariones.

Clasificación por la interacción

La mayor parte de las partículas elementales, incluso las que tienen vidas muy cortas, pueden existir dentro de los núcleos de los átomos. El delta, por ejemplo, tiene una vida

de 10^{-23} segundos pero, si se mueve a una velocidad cercana a la de la luz (3×10^{10} cm/s), puede recorrer 10^{-13} cm antes de desintegrarse. Este valor es típico de las distancias entre partículas en un núcleo, por lo que es posible que el delta sirva de medio de comunicación entre las distintas partes del núcleo durante su corta vida. Decimos que el delta "participa" en las interacciones que mantienen unido al núcleo. Todas las partículas que comparten esta característica se llaman hadrones ("las que interaccionan con fuerza"). Este término procede del hecho de que los físicos llaman interacción fuerte a la fuerza que mantiene unido el núcleo.

Casi todas las partículas conocidas son hadrones y el estudio de la materia hadrónica ha sido un tema muy importante de la física desde principios de los años sesenta. Sin embargo, unas pocas partículas no entran en esta categoría. El fotón, por ejemplo, no es un hadrón. Constituye, en realidad, una clase por sí mismo (extremo que más adelante resultará muy importante).

Las demás partículas no hadrónicas son las que intervienen en el proceso de la desintegración radiactiva. Estas partículas se denominan leptones ("las que interaccionan débilmente"). El leptón más familiar es el electrón. No existe en el núcleo de los átomos, sino que órbita alrededor suyo. Es uno de los productos finales de la desintegración relativamente lenta de partículas como el neutrón y el muon. Resulta que hay otras dos partículas parecidas al electrón. Ya nos hemos encontrado con una, el mesón mu. Tampoco existe en el núcleo, pero el punto clave es que si se exceptúa su masa mayor, el muon es exactamente igual al electrón. Tiene spin 1/2 y participa en los procesos de desintegración radiactiva. En realidad, esto ha preocupado a los físicos durante mucho tiempo. ¿Por qué la naturaleza ha hecho el electrón y luego ha repetido el mismo trabajo de nuevo pero doscientas veces más pesado?

En 1975 desapareció buena parte de la urgencia de esta cuestión cuando investigadores de la Stanford University descubrieron un tercer leptón, designado con la letra griega *tau* (τ). SU masa (1,8 G*e*V) era tres mil seiscientas veces la del

electrón y diecisiete veces la del muon, pero ésta era la única diferencia entre estas partículas y el tau. Parece como si la naturaleza, por alguna razón, hubiera hecho muchos leptones masivos.

Las otras partículas incluidas en la categoría de los leptones son los neutrinos. Sabemos que se produce la emisión de un neutrino en conjunción con mesones mu al desintegrarse el pión y también en la desintegración del neutrón. Sin embargo, resulta que los neutrinos emitidos en ambos procesos no son idénticos. Si tomamos un neutrino de la desintegración del pión y lo hacemos incidir sobre un blanco, producirá mesones mu, pero no electrones. A la inversa, los electrones de procesos como la desintegración del neutrón no pueden producir mesones mu. Es probable que los neutrinos emitidos en conjunción con el tau se comporten de igual forma. En otras palabras, parece haber un agrupamiento de los electrones y los neutrinos en parejas: cada partícula masiva se asocia con un tipo de neutrino y sólo con uno. Estos agolpamientos se denominan *generaciones*. En la tabla siguiente se muestran todos los leptones conocidos.

Generación	**Partícula masiva**	**Neutrino**
Primera	Electrón	Neutrino-e
Segunda	Mesón mu	Neutrino-μ
Tercera	Mesón tau	Neutrino-τ

Esto concluye nuestra exposición de las categorías más importantes en que se pueden agrupar las partículas elementales. Se observará que, aunque hemos hablado de propiedades tales como el spin y la desintegración, no hemos prestado mucha atención a la carga eléctrica. La razón es sencilla: a las temperaturas que reinaban hacia el principio de la era de las partículas, las interacciones entre partículas eran tan energéticas que puede suponerse que todos los miembros de una familia presentaban el mismo comportamiento, simplemente porque las diferencias debidas a los efectos eléctricos son tan pequeñas que pueden despreciarse. Así, por ejemplo, hablaremos del pión sin preocupamos en especificar de cuál de los tres mesones pi (positivo, neutro o negativo) se trata. El único lugar en que la carga eléctrica es importante es en las leyes de

conservación, tema al que dedicaremos ahora nuestra atención.

LAS LEYES DE CONSERVACIÓN DE LA FÍSICA DE LAS PARTÍCULAS

Las interacciones entre partículas elementales no ocurren al azar, sino que están gobernadas por un conjunto de principios generales conocidos como leyes de conservación. Un físico dice que una cantidad se “conserva" cuando no cambia durante un determinado proceso físico. Ya nos hemos referido a uno de estos principios, la conservación de la energía. La energía de un sistema aislado no puede cambiar, y hemos utilizado este hecho para mostrar que una partícula no puede originar productos de desintegración más pesados que ella misma. Si no fuera así, la energía de la masa de los productos de desintegración sería mayor que la energía de la masa de la partícula original, lo que significaría que la energía total del sistema se habría incrementado durante la desintegración. Esto sería una violación directa de la conservación de la energía y, por lo tanto, no puede ocurrir en la naturaleza. Este ejemplo ilustra el uso general de los principios de conservación. Estos principios nos dicen qué reacciones pueden tener lugar en la naturaleza y nos permiten explicar por qué ciertas reacciones (las que violan las leyes) no se observan nunca.

Otra ley de conservación importante en extremo gobierna la carga eléctrica. Si se suman las cargas eléctricas de las partículas que intervienen en una reacción y comparamos esta suma con la de las cargas de las partículas producidas, ambos números deben coincidir. Por ejemplo, la desintegración del neutrón puede escribirse simbólicamente:

$$n \rightarrow p + e + v$$

donde la letra griega *nu* (*v*) representa el neutrino. La carga total al principio es cero, ya que el neutrón es eléctricamente neutro. La carga total al final es + 1 (protón) – 1 (electrón) +

0 (neutrino) = 0, tal como debe ser. Aunque la conservación de la energía permitiría que el neutrón se desintegrara así:

$$n \rightarrow p + v + v$$

la conservación de la carga lo prohíbe, ya que supondría que la carga total del sistema cambia de 0 a +1 durante la desintegración. Una forma de considerar este resultado es advertir que, cuando decimos que las leyes de conservación de la carga prohíben la desintegración del neutrón mostrada más arriba, estamos diciendo que el tiempo necesario para que se produzca esta desintegración es infinito.

La carga es un ejemplo de algo que los físicos llaman una simetría interna del sistema. La carga eléctrica de una partícula no tiene nada que ver con lo deprisa que se está moviendo o si está girando alrededor de su eje. Es una cantidad totalmente particular que obedece su propio conjunto de reglas. Por lo que sabemos, la conservación de la carga es una ley exacta y universal y no se conocen violaciones de ella en la naturaleza. Sin embargo, hay otras simetrías internas que no son tan universales. En lugar de prohibir de manera categórica una determinada reacción, sólo imponen que la reacción se produzca mucho más despacio de lo que podría esperarse.

La primera de estas simetrías que se encontró se puso de manifiesto en algunas reacciones iniciadas por rayos cósmicos en 1947. Se observó que una partícula creada en la colisión de un protón con un núcleo vivía durante un tiempo muy largo antes de desintegrarse, unos 10^{-10} segundos. Esta partícula, que se designó con la letra griega *lambda* (Λ), era más pesada que el protón y los físicos estaban sorprendidos por el hecho de que no se desintegrara mucho más rápidamente de lo que hacía. A primera vista, podía esperarse que una partícula como ésta se desintegrara en un tiempo característico de las comunicaciones nucleares —unos 10^{-23} segundos más o menos— pero ésta tenía una vida un billón de veces más larga. Al descubrirse nuevas especies de estas partículas, se les dio el nombre de partículas extrañas y al final los físicos empezaron a considerar la “extrañeza” casi de la misma ma-

nera que consideraban la carga eléctrica. La extrañeza (o la falta de ella) se convirtió en un atributo intrínseco de las partículas, igual que la carga eléctrica, con la excepción de que la extrañeza no se conservaba estrictamente en las interacciones de las partículas. A diferencia de la conservación de la carga, la ley de la conservación de la extrañeza parecía decretar que cuando se violaba la conservación de la extrañeza (es decir, cuando la extrañeza era diferente después de una interacción de lo que había sido antes), el tiempo de la interacción aumentaba mucho, pero no hasta hacerse infinito. Por ejemplo, en la desintegración del lambda,

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^-$$

se conserva la carga eléctrica, pero no la carga de extrañeza.

La extrañeza de las partículas de la derecha es 0, mientras que la del lambda es, por convención, –1. Por lo tanto, la ley de la conservación de la extrañeza nos indica que esta reacción debe producirse con bastante lentitud, tal como realmente sucede.

En 1974 dos equipos independientes de físicos descubrieron una nueva partícula que mostraba otro tipo de simetría interna. Esta cantidad se llamó encanto (los físicos de partículas han adquirido la inquietante costumbre de encontrar nombres "ingeniosos" para las cantidades que introducen). El encanto puede considerarse también análogo a la carga eléctrica y, al igual que se descubrieron familias enteras de partículas con extrañeza, también se han observado en el laboratorio muchas partículas con encanto.

Se supone que existen dos atributos más como el encanto y la extrañeza. Se les designa con las letras *b* y *t*, y pueden escogerse nombres como *fondo ("bottom") y cima ("top") o belleza* ("beauty") y *verdad* ("truth"). Se han descubierto partículas que tienen carga *b*, aunque no en gran número. Aún no se han observado partículas *t*; se supone que tienen una masa de unas diez veces la del protón y por lo tanto un poco por encima de la capacidad de producción de los aceleradores actuales.

Por lo tanto, podemos definir una partícula de acuerdo con las distintas “cargas” que lleva. Por ejemplo, el protón tiene una carga eléctrica +1, extrañeza, encanto, *b* y *t* igual a 0. Esta ristra de números, junto con el que designa el spin, se llama números cuánticos de la partícula que se describe. Los números cuánticos de las antipartículas son, simplemente, los negativos de los asociados con la partícula.

QUARKS

Si volvemos a la idea con que empezamos esta discusión sobre partículas elementales —que los bloques elementales constitutivos de la materia deberían ser simples y pocos en número— es evidente que la proliferación de partículas elementales que se produjo entre 1950 y 1970 no es satisfactoria. Antes, siempre que se encontraba en la naturaleza una situación compleja como ésta, se descubría que descendiendo a un nivel más profundo de la realidad, la complejidad quedaba reemplazada por una nueva simplicidad. La idea de los átomos, así como la imagen de la materia a base de protones, neutrones y electrones, representan este tipo de procesos. No sorprenderá, por lo tanto, saber que ya a partir de 1964 los físicos postulaban que la multitud de partículas elementales estaban en realidad compuestas por partículas aún más básicas llamadas *quarks*. El nombre es una alusión a una línea de la obra *Finnegan’s Wake* de James Joyce: «Tres quarks para Muster Mark.» La alusión tenía sentido cuando se introdujo la teoría porque se creía al principio que había tres tipos diferentes de quarks. El nombre se ha mantenido a pesar de que el número de quarks ha aumentado desde entonces.

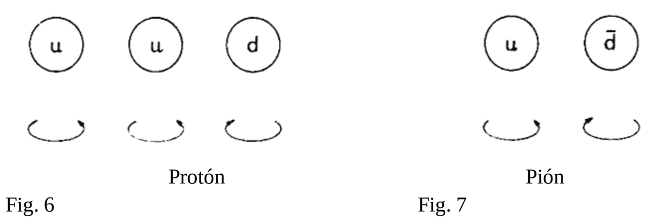
La idea es que los protones, los neutrones, los piones y todos los demás hadrones son simplemente disposiciones distintas de los quarks, los bloques constitutivos básicos. Los bailones están compuestos por tres quarks, mientras que los mesones están formados por un quark y un antiquark. La propiedad más sorprendente de los quarks es que tienen una

carga eléctrica fraccionaria. Los números cuánticos de los tres quarks originales se dan en la tabla siguiente:

Tipo de quark	Spin	Carga eléctrica	Extrañeza
u	1/2	2/3	0
d	1/2	–1/3	0
s	1/2	–1/3	–1

Los tres antiquarks, por supuesto, tienen cargas eléctricas y de extrañeza opuestas a las de la tabla. Es costumbre indicar los antiquarks escribiendo una barra encima de la letra. Por ejemplo, el quark anti-*u* se escribe $\bar{u}$.

Juntar estos quarks para caracterizar las partículas elementales es un ejercicio simple, algo parecido a construir una estructura con los bloques de construcción de los niños. El protón, por ejemplo, tiene que tener la estructura que se muestra en la figura 6. Está compuesto por dos quarks *u* y un quark *d*, dos de los cuales giran en sentido opuesto al tercero. El spin total de este objeto (la suma de los spins de los quarks) sería 1/2 + 1/2 – 1/2 = 1/2, mientras que la carga total sería 2/3 + 2/3 – 1/3 = 1. Éstos son, por supuesto, los números cuánticos del protón.



Protón Pión

Fig. 6 Fig. 7

Por otra parte, un pión tendría la estructura que se muestra en la figura 7: un quark *u* y un quark anti-*d* que giran en direcciones opuestas. El spin (1/2–1/2 = 0) y la carga eléctrica (2/3+1/3 = 1) de esta combinación son precisamente los valores que requiere el miembro de carga positiva de la familia del mesón pi.

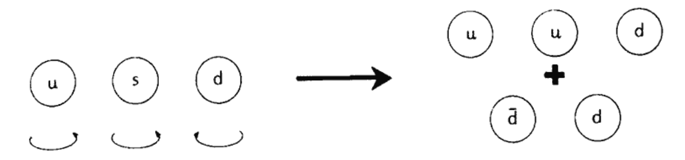


Fig. 8

De hecho, todas las partículas con carga de extrañeza cero pueden formarse mediante la combinación de los quarks *u*, $\bar{u}$, *d* y $\bar{d}$. Sin embargo, para producir una partícula con extrañeza, es necesario incluir el quark *s* en la estructura. Por ejemplo, si reemplazáramos uno de los quarks u del protón por un quark *s*, tendríamos una partícula con spin 1/2, carga eléctrica 2/3–1/3–1/3 = 0 y una carga de extrañeza 0+0–1 = –1. Éstos son precisamente los números cuánticos de la partícula lambda. La desintegración del lambda en un protón y un pión supone dos procesos a nivel de los quarks: el quark *s* debe convertirse en *u* o *d* y debe crearse un par quark-antiquark. Este proceso se describe en la figura 8. Por lo tanto, la desintegración lenta asociada con el cambio de extrañeza se interpretan, a nivel de los quarks, como que se deben a la necesidad de que uno de los quarks de la partícula original se convierta en un tipo diferente de quark.

Esta interpretación de la extrañeza indica por qué, cuando se descubrió una nueva partícula de vida larga de manera simultánea en los Brookhaven Laboratories de Nueva York y en el Stanford Linear Accelerator Center de California, la desintegración lenta se tomó como evidencia de un cuarto quark que llevaba un tipo de carga a la que se dio el nombre de encanto. En la tabla siguiente se indican los quarks que se han añadido a la lista desde entonces.

Quark	**Carga**	**Extrañeza**	**Encanto**	***b***	***t***
c	2/3	0	1	0	0
b	–1/3	0	0	1	0
t	2/3	0	0	0	1

Todos estos quarks tienen spin 1/2 y para cada uno de ellos hay toda una familia de partículas formadas mediante la sustitución de los quarks *u* y *d* de las partículas corrientes por

quarks *c, b* o *t.* La estructura del lambda, formado al sustituir un quark *u* del protón por un quark *s*, es un ejemplo de este proceso.

Es interesante señalar que, de la misma manera que hay seis leptones dispuestos en tres generaciones, también hay seis quarks. Los quarks también se pueden disponer en generaciones de la forma siguiente:

Generación	**Quarks**
Primera	*u, d*
Segunda	*s, c*
Tercera	*b. t*

La analogía entre quarks y leptones será importante más adelante.

Por último, hay otros dos términos que se utilizan al hablar de los quarks. Hemos hablado del tipo de quark cuando queremos distinguir, por ejemplo, entre los quarks s y *u.* Los físicos, siguiendo la tradición "ingeniosa", hablan del sabor del quark cuando hacen esta distinción. Así, los quarks *u* y *d* son de la misma generación, pero de sabores diferentes.

Por razones técnicas, no necesitamos profundizar más aquí, aunque los físicos creen que debe haber aún otra simetría interna asociada con los quarks, un tipo de atributo denominado *color.* A diferencia del encanto y la extrañeza, este atributo particular no tiene ninguna consecuencia experimental inmediata que pueda particularizarse con facilidad. Por lo tanto, de momento sólo señalaremos que en las grandes teorías unificadas, cada uno de los tipos de quarks de las tablas (*u, d, s, c, b* y *t*) es en realidad una familia de tres quarks, cada uno de ellos con una "carga" de color distinta. Es similar a lo que ocurre con el pión, donde el π es en realidad una familia de tres partículas que se distinguen por tener una carga eléctrica distinta. Los quarks pueden imaginarse como si fueran de color rojo, blanco y azul (mis colores favoritos) o rojo, verde y azul (los colores primarios), ya que por el momento no hay una terminología cromática aceptada en general. Lo más importante que hay que tener en cuenta es que esta terminología no debe sugerir que los quarks están recubiertos con alguna especie de pintura. El color, aplicado a los quarks,

se refiere simplemente a una propiedad intrínseca de las partículas, como lo es la carga eléctrica y la extrañeza.

SUMARIO

Las propiedades de las partículas elementales que pueden usarse para su clasificación son la masa, el spin y la desintegración. La masa de las partículas elementales se mide en unidades llamadas G*e*V (gigaelectronvoltio); 1 G*e*V es ligeramente superior a la masa del protón. Cabe imaginar las partículas como pequeñas esferas que giran alrededor de su eje. Las leyes de la mecánica cuántica exigen que la velocidad de rotación de una partícula dada tenga unos valores concretos. Es costumbre describir la rotación de una partícula mediante el número por el que hay que multiplicar la velocidad de rotación básica para obtener la velocidad real de la partícula. De este modo, una partícula que gira a 1/2 de su velocidad de rotación básica se dice que tiene spin 1/2, y así sucesivamente.

Casi todas las partículas elementales son inestables en el sentido de que si se las deja solas un tiempo suficiente se desintegran y producen un nuevo conjunto de partículas llamadas productos de desintegración. El tiempo de vida de una partícula es el tiempo medio que puede vivir antes de desintegrarse; puede ser tan corto como 10^{-23} segundos (partícula delta) o tan largo como miles de millones de años (núcleo de uranio).

Basándose en estas y otras propiedades, las partículas pueden clasificarse de muchas maneras. Algunas categorías que serán importantes son las siguientes:

Fermiones:	partículas de spin 1/2, 3/2, 5/2...
Bosones:	partículas de spin 0, 1, 2, 3...
Bariones:	partículas cuyos productos de desintegración finales incluyen un protón.
Mesones:	partículas cuyos productos de desintegración finales no incluyen un protón.

Hadrones: partículas que intervienen en la interacción que mantiene unido el núcleo.
Leptones: partículas que no intervienen en la interacción que mantiene unido el núcleo.

De todas estas categorías, los leptones son los más sencillos de describir, dado que sólo hay seis de ellos. Todos son fermiones de spin 1/2, y el electrón es el más familiar. Con cada leptón masivo, como el electrón, está asociada una partícula sin masa llamada neutrino. Hablamos de agrupar los leptones en generaciones. Así, la primera generación de leptones está constituida por el electrón y su neutrino asociado, la segunda por el mesón mu con su neutrino y la tercera por el mesón tau con otro neutrino. Los mesones mu y tau son parecidos en todos los aspectos al electrón, excepto en el hecho de que son más pesados.

El comportamiento de las partículas elementales está gobernado por un conjunto de leyes de conservación. Estas leyes establecen que en cualquier interacción determinadas cantidades no se modifican (se conservan). La carga eléctrica es un ejemplo de ello, puesto que no conocemos ningún caso en que cambie la carga total de un sistema aislado. Esta ley está asociada a la existencia de la carga eléctrica como una propiedad de las partículas elementales. Además de la carga eléctrica familiar, hay otros atributos del mismo tipo asociados a las partículas elementales. Estos otros atributos (o simetrías internas, para usar el término técnico) son la extrañeza (*s*), el encanto *(c)*, la belleza *(b)* y la verdad *(t).* A diferencia de la carga eléctrica, estas otras "cargas" no se conservan estrictamente, pero las reacciones en las que cambian tienen lugar con mucha más lentitud que las reacciones en que no cambian.

Se cree que los centenares de partículas elementales conocidas están constituidas por bloques constitutivos aún más elementales, llamados quarks. Los bariones están compuestos por tres quarks y los mesones por un quark y un antiquark. Hay seis tipos de quarks, todos ellos con una carga eléctrica fraccionaria. Además, los quarks *s*, *c*, *b* y *t* tienen cada uno de

ellos una unidad de carga de extrañeza, de encanto, de belleza o de verdad, respectivamente. Por último, se cree ahora que existe todavía otra simetría interna llamada color y que cada tipo de quark representa en realidad una familia de tres partículas, que son idénticas en todos los aspectos excepto en que tienen distinto color. Por lo tanto, se requieren dieciocho quarks (seis tipos de tres colores cada uno) y dieciocho antiquarks para hacer el mundo.

V. LAS FUERZAS FUNDAMENTALES

Todos los cuerpos permanecen en estado de reposo,
o de movimiento uniforme en línea recta,
a menos que sean obligados a cambiar su estado
por fuerzas aplicadas sobre ellos.

ISAAC NEWTON
Principia Mathematica

LA GRAVEDAD

Todos tenemos un contacto constante con una de las fuerzas fundamentales de la naturaleza, la fuerza de la gravedad. A pesar de sernos tan familiar esta fuerza en nuestra existencia cotidiana, no se comprendió un hecho muy importante de la gravedad hasta que Isaac Newton formuló su ley de la gravitación universal, en 1666. Hasta la época de Newton, se creía de modo general que no había una, sino dos fuerzas de gravedad en acción en el Universo. Una de ellas, la que se observaba en la Tierra, es la fuerza familiar que causa la caída de los cuerpos cuando están sin apoyo; la otra fuerza, que no se conocía con el nombre de gravedad, operaba en los cielos, impulsaba los planetas y las estrellas en sus esferas de cristal. En el pensamiento prenewtoniano, los dos fenómenos eran tan claramente diferentes que resultaba obvio que las dos fuerzas que intervenían eran totalmente distintas y no guardaban ninguna relación entre sí.

El gran logro de Newton fue demostrar que había una sola fuerza gravitatoria en el Universo y que el movimiento de los planetas y la caída de una manzana eran ambos simples manifestaciones de un único efecto universal. En lenguaje moderno, decimos que Newton "unificó" las dos fuerzas de gravedad y que la teoría newtoniana de la gravitación es una "teoría unificada". Dado que, al tratar de este tema, hablamos

a menudo de campos gravitatorios, se podría aplicar también el término de *teoría del campo unificado*.

La forma en que Newton llegó a su ley de la gravitación universal resulta interesante. Empezó por reflexionar acerca de un simple proyectil lanzado desde la superficie terrestre. El objeto recorre cierta distancia (unos metros, p. ej.) antes de que la fuerza de la gravedad terrestre tire de él hasta el suelo. Si se lanzara el proyectil con más fuerza, iría más lejos antes de tocar el suelo; asimismo, cuanto más rápido se moviera, más lejos llegaría. Newton llevó este proceso hasta el caso extremo e imaginó que si se lanzaba un objeto con la suficiente velocidad, éste podría dar la vuelta entera a la Tierra y volver al punto desde donde había sido lanzado. Con la velocidad adecuada, regresaría a este punto moviéndose exactamente a la misma velocidad con la que había salido de él, en cuyo caso volvería a dar más vueltas. La semejanza entre el proyectil que daba vueltas a la Tierra y la Luna en su órbita fue todo lo que Newton necesitó para darse cuenta de que no había ninguna razón para la existencia de dos fuerzas gravitatorias distintas en el Universo. La misma fuerza, la que hoy llamamos gravedad, podía explicar tanto el movimiento de los objetos cerca de la superficie de la Tierra como el de los cuerpos en órbita en el Sistema Solar. Desde aquel momento, desapareció la distinción artificial entre los fenómenos celestes y los terrestres y se supuso que las mismas leyes operaban en todas partes.

Para nuestra discusión, las dos características más importantes de la gravedad son su alcance y su intensidad. El alcance de una fuerza es la distancia a la que llegan sus efectos. Para la gravedad, el alcance es infinito. Las galaxias más remotas están ejerciendo una fuerza sobre el lector de este libro, aunque es tan pequeña que jamás podría medirse. Conforme a lo expresado por Newton, todo cuerpo del Universo ejerce una fuerza sobre los demás cuerpos, sin importar lo grande que sea su separación.

La intensidad de una fuerza es algo que por regla general se expresa en relación con otras fuerzas y no en términos absolutos. Aunque puede ser difícil de creer después de haber

ayudado a un amigo a subir un sofá hasta un tercer piso, la gravedad es con mucho la más débil de las fuerzas fundamentales. La razón de que ejerza una influencia dominante en nuestras vidas se debe a que vivimos en la superficie de una masa inmensa (la Tierra), que funciona como un gigantesco generador de fuerza gravitatoria. Sin embargo, el hecho de que se pueda levantar un clavo con un imán muestra que ni siquiera la Tierra entera tirando de un lado puede contrarrestar la fuerza magnética ejercida por algo que se puede sostener en una mano.

EL ELECTROMAGNETISMO

Los griegos sabían muy bien que si se frotaban determinados objetos comunes, como un pedazo de ámbar, se les adherían pequeños fragmentos de materia. Hoy diríamos que los griegos conocían la electricidad estática. (Por cierto, la palabra *electrón* significa ámbar en griego.) Los griegos también estaban familiarizados con la fuerza magnética. Sin embargo, hasta finales del siglo XVIII, no se estudió de manera sistemática ninguna de estas dos fuerzas, aunque el magnetismo se había usado extensivamente en las brújulas de navegación. Sabemos que hay dos clases de carga eléctrica, que llamamos positiva y negativa, y que las cargas iguales se repelen, mientras que las diferentes se atraen. También sabemos que si acercamos dos imanes, sus polos norte se repelen, pero el polo norte y el sur se atraen mutuamente. Como en el caso de la gravedad terrestre y celeste, no parece haber mucha conexión entre el imán que sujeta una nota en la puerta del refrigerador y la electricidad estática que hace saltar una chispa desde la mano después de haber andado sobre una alfombra en un día seco.

Uno de los grandes logros de la física del siglo XIX fue demostrar que estas dos fuerzas, aparentemente tan diferentes, sólo son, de hecho, aspectos distintos de una única fuerza: el electromagnetismo.

El primer paso en este proceso de comprensión lo dio el físico danés Hans Christian Oersted, en 1819. Casi por accidente, observó que cuando conectaba un hilo entre los polos de una batería, de forma que circulara una corriente eléctrica, se desviaba la aguja de una brújula situada cerca. La investigación posterior reveló que siempre que se movía una carga eléctrica, ésta era capaz de producir una fuerza magnética. Y esto era cierto tanto si la carga en cuestión era una única partícula que se movía libremente por el espacio, como si era la multitud de partículas que constituyen una corriente eléctrica en un alambre. No se tardó mucho en establecer la relación inversa. Se demostró que un imán en movimiento era capaz de ejercer una fuerza eléctrica (es decir, de hacer que se moviera una carga eléctrica). Se estableció así una conexión entre dos fenómenos aparentemente dispares. Esta conexión representa un tipo de unificación algo más abstracto que la establecida por Newton para la gravedad. Los fenómenos eléctricos y magnéticos se siguen percibiendo como si fueran diferentes, pero estos experimentos ponen de manifiesto que las diferencias no son en realidad fundamentales. Por lo tanto, los físicos se vieron llevados a considerar que la electricidad y el magnetismo eran dos manifestaciones distintas del mismo proceso subyacente.

El toque final en este proceso de unificación estuvo a cargo del físico escocés James Clerk Maxwell, que publicó lo que ahora se considera la teoría definitiva del electromagnetismo en forma de cuatro ecuaciones (conocidas, muy apropiadamente, como las ecuaciones de Maxwell). En estas ecuaciones intervienen por igual la electricidad y el magnetismo entrelazados de un modo inextricable. En efecto, las ecuaciones muestran que en el espacio libre, lejos de cualquier material, es posible intercambiar campos eléctricos y magnéticos sin producir ninguna variación en las ecuaciones básicas.

Igual que en el caso de la gravedad, el alcance de la fuerza electromagnética es infinito. Una partícula cargada en un lado de la Galaxia es, en principio, capaz de ejercer una fuerza sobre otra partícula cargada en el lado opuesto de la Galaxia,

aunque la fuerza sería extremadamente pequeña a causa de la distancia entre ellas. Aunque el electromagnetismo, tal como hemos dicho, es una fuerza más intensa que la gravedad, dentro de la jerarquía de las fuerzas fundamentales su intensidad es intermedia, ni la más fuerte ni la más débil.

El papel más importante del electromagnetismo en la naturaleza es servir de fuerza que mantiene los electrones en sus órbitas unidos a los núcleos de los átomos. También es la fuerza que mantiene unidos los distintos átomos que forman las moléculas y la que mantiene unidas a éstas en los sólidos. Por lo tanto, en un sentido muy literal, la fuerza electromagnética es la responsable de la mayoría de las cosas que vemos en el mundo que nos rodea.

FUERTE Y DÉBIL: LAS FUERZAS SUBATÓMICAS

El desarrollo de la física nuclear a finales del siglo XJX y a principios del XX condujo al descubrimiento de las dos restantes fuerzas fundamentales: las fuerzas (o interacciones) fuerte y débil. Estas fuerzas son menos familiares ya que no se manifiestan de manera directa en procesos corrientes. Sin embargo, son reales y pueden ser estudiadas.

La existencia de la fuerza fuerte está, en realidad, implícita en el modelo del átomo, en el que toda la carga positiva está concentrada en el volumen diminuto del núcleo. Sabemos que, del mismo modo que las cargas iguales se repelen, si dos protones de un núcleo están realmente a una distancia de sólo 10^{-13} cm, deben empujarse uno a otro con una fuerza tremenda. Si, por ejemplo, los protones tuvieran el tamaño de pelotas de baloncesto, la fuerza de repulsión entre ellos sería tan grande que los dispararía en direcciones opuestas aunque se encerraran en un bloque sólido de acero. La pregunta lógica es, por consiguiente, cómo el núcleo puede mantenerse unido frente a esta repulsión eléctrica disruptiva. Sin duda, debe de existir alguna otra fuerza capaz de superar la repulsión y mantener unido el núcleo. Existe, en efecto: es la fuerza fuer-

te, cuyo estudio ha constituido uno de los temas más importantes de la ciencia del siglo XX.

Como su nombre implica, la fuerza fuerte es la más potente de todas las interacciones conocidas. Su alcance, sin embargo, es bastante limitado. De hecho, dos partículas sólo son capaces de ejercer una sobre otra esta fuerza si están dentro del mismo núcleo. Si están a una distancia superior a unos 10^{-13} cm, la fuerza fuerte deja de operar. Por consiguiente, los protones de los núcleos de dos átomos diferentes no pueden ejercer ninguna acción entre sí por vía de la fuerza fuerte.

La fuerza débil es conocida por su papel en la desintegración radiactiva. La radiactividad natural fue descubierta y estudiada por Antoine Henri Becquerel, Pierre y Marie Curie y otros a finales del siglo XIX. En la década de 1930, los científicos aprendieron a crear nuevas especies de núcleos inestables, y la radiactividad artificial se ha convertido, para bien o para mal, en parte integrante de nuestras vidas. Si consideramos el núcleo de un átomo de uranio, ninguna de las otras tres fuerzas puede explicar por qué puede emitir dos protones y dos neutrones y se transforma, en el proceso, en un núcleo de torio. Este tipo de desintegración lenta tiene que estar gobernado por una fuerza aún no definida, la fuerza débil. Al igual que la fuerza fuerte, la interacción débil no es nada con lo que tengamos una amplia experiencia cotidiana. Tiene un alcance muy corto —sólo unos 10^{-15} cm (aproximadamente 1% del tamaño de un protón)— y en la escala de intensidades es intermedia entre el electromagnetismo y la gravedad.

LAS CUATRO FUERZAS: UN REPASO

La situación en el momento actual es que parece que podemos explicar todo lo que observamos en la naturaleza en términos de cuatro fuerzas fundamentales: gravitatoria, electromagnética, fuerte y débil. Las dos primeras representan en realidad unificaciones de otras fuerzas que con anterioridad se

creía que eran distintas y fundamentales por derecho propio. La tabla siguiente es un resumen de sus propiedades.

Propiedades de las fuerzas fundamentales

Fuerza	Intensidad (relativa a la fuerte)	Alcance (cm)
Fuerte	1	10^{-13}
Electromagnética	1/137	Infinito
Débil	10^{-5}	10^{-15}
Gravitatoria	6×10^{-39}	Infinito

Lo primero que nos sorprende al examinar la tabla es la enorme disparidad de las intensidades de las fuerzas, puesto que se extienden a lo largo de treinta y nueve órdenes de magnitud, un número tan grande que resulta casi incomprensible. Los alcances de las fuerzas van desde algo más pequeño que un protón hasta algo suficientemente grande para abarcar todo el Universo. Ante estos hechos, parecería razonable suponer que la unificación que realizamos con éxito antes debe detenerse en este punto. ¿Cómo podría ser que fuerzas tan diferentes tuvieran en realidad una identidad subyacente?

¿Pero son en realidad tan grandes como parecen estas diferencias? ¿Son, por ejemplo, mayores que las que se suponía que existían entre la fuerza que hace caer un objeto al suelo y la que mantiene un planeta en su órbita? Yo diría que las unificaciones conseguidas antes del siglo XX eran como mínimo tan difíciles como la tarea de unificar las fuerzas de la tabla. Esto es cierto en particular en el caso de la teoría newtoniana de la gravitación, un caso en el que no había virtualmente ningún precedente teórico de síntesis.

Además, hay algo poco elegante en esencia en el hecho de tener que disponer de cuatro fuerzas diferentes (y en consecuencia, de cuatro teorías diferentes) para explicar cuatro tipos diferentes de fenómenos naturales. Es evidente que tiene que haber por lo menos una fuerza en la naturaleza ya que, de otro modo, no podría haber ninguna interacción. ¿Pero qué tiene de especial el número 4? Si aceptamos que las cuatro fuerzas son realmente fundamentales e independientes, tenemos que enfrentamos de inmediato con el problema de explicar por qué hay cuatro fuerzas y no tres, o cinco, o cualquier otro número. Esta falta aparente de elegancia preocupa mucho

a los físicos, a los que les gusta creer que la naturaleza tiene que ser fundamentalmente simple y bella.

El hecho de que en el pasado se hayan conseguido unificaciones no significa, por supuesto, que la de las cuatro fuerzas tenga que ser sencilla. Hombres de la talla de Albert Einstein dedicaron buena parte de sus vidas a tratar de desarrollar la teoría unificada final y fracasaron. Einstein empezó con la gravedad y trató de unificar las demás fuerzas con ella. Resulta que ésta es la forma más difícil de tratar el problema, hecho que, en retrospectiva, ayuda a explicar el fracaso de Einstein. Veremos que hay que empezar por las fuerzas que actúan entre partículas elementales —las fuerzas débil, electromagnética y fuerte— si queremos llegar a una teoría unificada. Esto significa a su vez que debemos tener cierta comprensión de la manera que la física moderna considera estas fuerzas, tema al que vamos a dedicar ahora nuestra atención.

LAS FUERZAS COMO INTERCAMBIO

Cuando Newton dio su primera definición de fuerza, su propósito principal era mostrar la forma de reconocer cuándo actúa una fuerza. Lo que la gente tenía en mente cuando pensaba en fuerzas eran las nociones de sentido común de tirar y empujar. Esto condujo a algunos debates interesantes, aunque sin sentido, sobre la cuestión de la "acción a distancia". ¿Cómo podía afectar el Sol el movimiento de la Tierra si no estaban en contacto el uno con la otra?

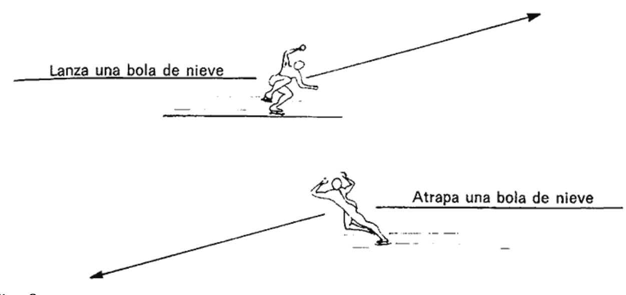


Fig. 9

La respuesta a esta vieja cuestión y a muchas otras puede encontrarse en una nueva manera de considerar las fuerzas, surgida del estudio de las partículas elementales. En la actualidad, se considera que las cuatro fuerzas fundamentales son resultado del intercambio de partículas elementales. Una analogía sencilla puede ayudar a comprender este concepto. Supongamos que dos patinadores sobre hielo se están moviendo el uno hacia el otro en trayectorias paralelas, tal como se indica en la figura 9. En un punto determinado un patinador lanza una bola de nieve al otro, y al hacerlo retrocede ligeramente. Unos instantes más tarde la bola de nieve alcanza al segundo patinador y lo hace retroceder en la dirección opuesta. El efecto neto, por lo tanto, es que las trayectorias de ambos patinadores se desvían al acercarse el uno al otro. Aplicando la definición de Newton, diríamos que ha actuado una fuerza sobre los patinadores, ya que han dejado de moverse en la dirección inicial. De hecho, dado que los patinadores se han desviado separándose el uno del otro, diríamos que ha actuado una fuerza de repulsión. Resulta algo más difícil encontrar una analogía sencilla que asocie una fuerza atractiva con un intercambio, pero puede lograrse cierta idea de cómo es esta situación si imaginamos que el primer patinador lanza el extremo de una cuerda muy ligera al otro. Si ambos mantienen la cuerda tirante, sus trayectorias serán de la forma que se muestra en la figura 10. En este caso, hablaríamos de una fuerza de atracción que actúa entre los patinadores. Veremos que, a nivel de las partículas elementales, los intercambios generan tanto fuerzas atractivas como repulsivas.

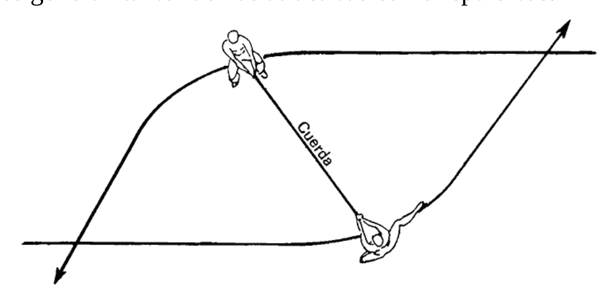


Fig. 10

El indicio de que una situación así pudiera ocurrir en la interacción fuerte surge a causa de una característica importante del mundo subatómico: el principio de incertidumbre de Heisenberg. La versión de este principio que nos interesa considerar aquí se refiere a la ley de conservación de la energía. Puesto que sabemos que se necesita energía para producir una partícula masiva, era de esperar que una interpretación estricta de esta ley prohibiera que un protón aislado en el vacío emitiera una partícula como el pión. Para emitirla sería preciso que la energía de la masa del pión surgiera de la nada. Esta interpretación, sin embargo, ignora un hecho muy importante acerca de la conservación de la energía (o de cualquiera de los demás grandes principios de la física): la validez de cualquier ley natural se establece mediante la experimentación, y una ley es sólo tan buena como lo son los experimentos utilizados para confirmarla. Imaginemos que el protón, mediante algún proceso, pudiera crear un pión, pero que lo reabsorbiera en un tiempo tan corto que no pudiéramos detectar el cambio de energía asociado con su creación. Si esto sucediera, no podríamos decir que se ha violado la ley de conservación de la energía, ya que no podríamos detectar ninguna evidencia de esta violación. Sería como si alguien entrara en la oficina y tomara prestado un libro, pero lo devolviera antes de que nadie lo echara en falta. Nadie podría afirmar que el libro hubiera desaparecido.

Desde el punto de vista de la física tradicional, no se toman en consideración procesos como la creación del pión porque decimos que, en principio, podríamos observar el protón con una escala de tiempo tan pequeña como quisiéramos, por lo que siempre podríamos hacer el tiempo de observación más corto que el necesario para reabsorber el pión. Sin embargo, en mecánica cuántica no es posible esta vigilancia constante. El principio de incertidumbre tiene en cuenta el hecho de que cualquier medición que se realice en una partícula la afecta, de modo que hay un límite en la precisión con que podemos conocer dos magnitudes distintas, como la energía de la partícula y el instante en que posee esta energía. En esencia, la incertidumbre surge porque con cuanta mayor

precisión midamos una magnitud, más perturbamos el sistema y menos información podemos obtener con nuestra segunda medida.

Si llamamos ΔE la incertidumbre en nuestro conocimiento de la energía de un sistema y Δt la incertidumbre en nuestro conocimiento del tiempo en que el sistema tiene dicha energía, la expresión matemática del principio de incertidumbre es

$$\Delta E \times \Delta t > h$$

donde > es el símbolo matemático que significa "mayor que" y h es un número conocido como constante de Planck (en honor al físico alemán Max Planck, uno de los fundadores de la física moderna). Esta expresión establece que si medimos la energía de un sistema con mucha precisión, de forma que ΔE sea muy pequeño, entonces Δt tiene que ser muy grande. Este hecho puede imaginarse de la forma siguiente: para determinar E con precisión, hay que observar el sistema durante mucho tiempo; el resultado de una medida de larga duración será una determinación precisa de la energía media del sistema durante ese período pero será imposible decir exactamente cuándo el sistema tenía en realidad ese valor de la energía, lo que significa que Δt tiene que ser muy grande.

Teniendo en cuenta esto, volvamos hacia atrás y reflexionemos sobre el protón y el pión. Hemos dicho que el pión no puede aparecer de la nada, afirmación sin duda correcta. Sin embargo, planteemos la cuestión de una forma ligeramente distinta. ¿Durante cuánto tiempo podría ser suficientemente grande la incertidumbre en nuestro conocimiento de la energía del protón para que no pudiéramos decir, según el principio de incertidumbre, si se ha creado un pión? En otras palabras, ¿qué pasaría si el protón creara de repente un pión de la nada pero lo reabsorbiera demasiado deprisa para que se pudiera detectar su presencia? Un proceso así no violaría la conservación de la energía, ya que no podría haber ningún experimento realizable, siquiera en principio, que pudiera poner de manifiesto el cambio espontáneo de la energía del protón.

En el sistema de unidades en el que las longitudes se miden en centímetros y las masas en gramos, *h* tiene el valor de $6{,}6\times10^{-27}$, la masa del pión es de unos $1{,}8\times10^{-25}$ g y *c* es 3×10^{10} cm/s. Según el principio de incertidumbre, la incertidumbre de la energía del protón podría ser tan grande como la energía de la masa del pión ($m\pi c^2$) durante un tiempo Δt si tuviéramos

$$(m\pi c^2)\ \Delta t > h$$

o bien

$$\Delta t > 4\times10^{-23}\ \text{seg}$$

En otras palabras, en el mundo cuántico, un protón puede crear un pión de la nada, siempre que el pión no permanezca por allí más de este lapso de tiempo. Igual que Cenicienta, si el pión regresa a casa a tiempo, nadie podrá decir que haya algo anormal. Una partícula que sólo existe durante el efímero instante permitido por el principio de incertidumbre se llama partícula virtual.

Puede verse la conexión entre un pión virtual y la fuerza fuerte si averiguamos la distancia que puede recorrer un pión durante el tiempo que hemos calculado. Puesto que el pión puede moverse, como máximo, a la velocidad de la luz, la distancia que puede recorrer es $c \times \Delta t$, unos 10^{-12} cm. Ésta es la medida aproximada del diámetro de un núcleo de tamaño medio. Es decir, dos protones de un núcleo podrían intercambiar un pión entre sí de manera muy parecida a como los patinadores intercambiaban bolas de nieve o cuerdas en nuestra analogía. Siempre que el primer protón emita el mesón virtual y el segundo lo absorba en un tiempo menor de 4×10^{-23} s, el proceso no viola ninguna ley conocida de la física.

Del mismo modo que puede considerarse que el intercambio de bolas de nieve entre los patinadores provoca la actuación de una fuerza, también puede considerarse que el intercambio de piones virtuales genera una fuerza entre las partí-

culas del núcleo. Y del mismo modo que una bola de nieve puede lanzarse sólo hasta una distancia determinada, de forma que hay un límite al alcance de la "fuerza de las bolas de nieve", un pión virtual sólo puede recorrer una distancia corta sin violar el principio de la conservación de la energía. En ambos casos, la fuerza generada por el intercambio tiene un alcance limitado. De hecho, la única diferencia entre la bola de nieve y el pión es que la primera produce una fuerza de repulsión, mientras que el segundo la produce de atracción.

Esta fuerza debida al intercambio de piones, que tiende a mantener las partículas juntas en el núcleo, es lo que identificamos con la interacción fuerte. En cierto sentido, los piones virtuales forman el pegamento que mantiene unido el núcleo a pesar de las intensas fuerzas de repulsión que se ejercen entre los protones. Por consiguiente, una forma de representar el núcleo es imaginar que los protones y los neutrones situados en él emiten y absorben piones virtuales. En la figura 11 se muestra esquemáticamente este proceso, con un núcleo sencillo de dos partículas a la izquierda y un núcleo más complejo a la derecha.

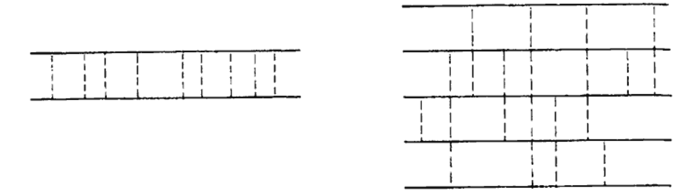


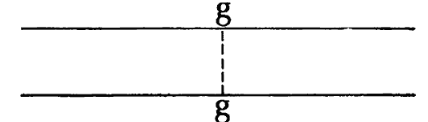
Fig. 11

Ahora bien, el argumento que hemos dado para la existencia de piones virtuales no tiene por qué restringirse a una sola especie de partículas. Cualquier partícula puede existir en estado virtual, pero cuanto mayor sea la masa de la partícula, mayor tiene que ser ΔE, la incertidumbre de energía. Esto implica que Δt, el tiempo durante el cual puede existir la partícula, tiene que ser menor que el tiempo permitido en el caso del pión y por lo tanto la distancia que puede recorrer la partícula (valor que identificamos con el alcance de la fuerza) tiene que ser más pequeña. Cuanto más pesada sea la partícu-

la intercambiada, menor será el alcance de la fuerza. El pión, al ser el hadrón más ligero, estará asociado con la parte de largo alcance de la fuerza fuerte, pero otras partículas más pesadas intervendrán cuando los protones estén más juntos. De hecho, es habitual en estos días que los teóricos nucleares incluyan muchas partículas más pesadas que el pión en sus cálculos.

Por lo tanto, vemos que una propiedad importante de las fuerzas —su alcance— puede interpretarse en términos del mecanismo de intercambio. ¿Qué hay de la otra propiedad importante, la intensidad? Si volvemos a considerar la analogía de los patinadores y las bolas de nieve, nos daremos cuenta de que la magnitud de la desviación de la trayectoria de los patinadores —cantidad que asociaremos con la intensidad de la fuerza— depende de lo que se intercambia. Si los patinadores se lanzaran agua o se soplaran una corriente de aire a través de un tubo, la magnitud de la desviación sería mucho más pequeña que la experimentada con la bola de nieve. La intensidad de la fuerza que asociamos con el intercambio depende claramente de la forma en que lo que se intercambia interacciona con los blancos.

En nuestro modelo de intercambio de partículas, esta dimensión adicional del proceso se tiene en cuenta asignando un número para expresar la intensidad de la interacción en los puntos donde se emite y se absorbe la partícula. Estos puntos corresponden a los vértices marcados con una *g* minúscula en la figura 12.



Flg. 12

El número, que indicaremos por g, se denomina constante de acoplamiento. Es el número al que nos hemos referido vagamente al hablar hasta ahora de la intensidad de las fuerzas. Las constantes de acoplamiento asociadas con las fuerzas fundamentales serán muy importantes en el desarrollo de las

teorías unificadas que describiremos en los capítulos siguientes.

LAS FUERZAS FUNDAMENTALES COMO INTERCAMBIOS

Dos de las fuerzas fundamentales, el electromagnetismo y la gravedad, tienen un alcance infinito. A partir de nuestro conocimiento del modelo de intercambio, sabemos que cuanto menor es la masa de la partícula intercambiada, mayor es el alcance de la fuerza asociada. No resulta difícil extrapolar esta idea del alcance en aumento hasta el límite de una partícula de masa cero. En este caso, si utilizamos el mismo tipo de argumento que seguimos para el intercambio de un mesón, vemos que el alcance de la fuerza sería infinito. Llegamos así a la conclusión de que las partículas que se intercambian en las interacciones eléctricas y gravitatorias deben tener masa cero.

Si recordamos lo que se dijo acerca de la clasificación de las partículas en el capítulo 4, el fotón formaba una categoría él solo. Resulta que el fotón es precisamente la partícula de masa nula cuyo intercambio genera la fuerza electromagnética. Cuando se levanta un clavo con un imán, se intercambia una cantidad inmensa de fotones entre las partículas del clavo y las del imán. El efecto neto de todos estos intercambios es lo que llamamos fuerza magnética. Sucede lo mismo cuando uno se peina el pelo en un día seco y luego se adhieren al peine trocitos de papel. La fuerza de la electricidad estática también está generada por un flujo de fotones. Al nivel de las partículas elementales, cuando colisionan dos electrones, dibujamos la interacción de manera esquemática como en la figura 13, donde las dos líneas rectas indican el movimiento de las partículas y la línea ondulada representa el fotón que se han intercambiado.

A propósito, si quedaba alguna reserva acerca de la unificación histórica de la electricidad y el magnetismo, quedará disipada en este punto. Si las fuerzas eléctrica y magnética proceden del intercambio de fotones, no hay que vacilar en

decir que ambas fuerzas son simplemente aspectos distintos del mismo proceso subyacente.

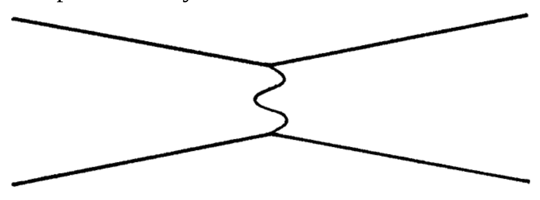


Fig. 13

La partícula de masa nula asociada con la gravedad se llama gravitón. No nos es tan familiar como el fotón, al que observamos en forma de luz visible, y no se ha detectado aislado en el laboratorio. Más adelante veremos que no hay una comprensión teórica clara de la conexión del mundo subatómico con la fuerza de la gravedad, por lo que esta situación no resulta demasiado sorprendente. Para nuestros propósitos, sólo señalaremos que el gravitón es una partícula de masa nula y spin 2 cuyo intercambio entre objetos se cree que genera la fuerza gravitatoria. Si consideramos la fuerza gravitatoria de esta manera, la vieja cuestión filosófica de la acción a distancia desaparece del todo. Hay una conexión muy definida entre la Tierra .y el Sol: ambos intercambian sin interrupción chorros de gravitones. En consecuencia, no es sorprendente que pueda existir una fuerza entre ambos. Señalemos de pasada que la imagen de la gravedad causada por intercambio de partículas es muy diferente de la imagen que presenta la relatividad general. Volveremos sobre este punto en el capítulo 13.

La fuerza débil tiene un alcance muy corto, por lo que cabe esperar que sea producida por partículas pesadas. De acuerdo con la teoría, debería haber tres de estas partículas, que se supone que tienen masas de unos 80 a 100 G*e*V y spin 1. Según nuestro esquema de clasificación de las partículas elementales, todas las partículas de spin 1 son bosones. Por convención histórica, las partículas de spin 1 se denominan partículas vectoriales, por consiguiente las partículas que

intervienen en la interacción débil suelen denominarse bosones vectoriales.

Hay tres bosones vectoriales implicados en la interacción débil y que difieren en la carga eléctrica que llevan. Los dos miembros con carga de la familia se llaman W^+ y W^- respectivamente, mientras que el miembro neutro se llama $Z°$. Un ejemplo de la función de los bosones vectoriales aparece en la desintegración del neutrón, proceso que ya hemos comentado. La desintegración se produce en realidad tal como se indica en la figura 14.

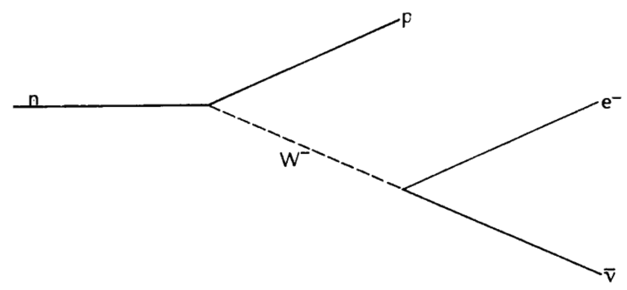


Fig. 14

Ya hemos hablado de la generación de la fuerza fuerte a través del intercambio de piones y otras partículas, pero ésta es una forma un poco superficial de considerar la cuestión. Hemos argumentado que los hadrones no son realmente elementales, y parecería que la forma apropiada de intentar describir las fuerzas entre ellos sería examinar las fuerzas entre los quarks. Por lo tanto, en lugar de hablar del intercambio de un pión, hablaremos del intercambio de un quark y un antiquark que se encuentran fuertemente unidos. En este esquema, la verdadera descripción de la fuerza fuerte se referirá a las partículas intercambiadas entre los quarks.

Más adelante se dará una descripción completa de la teoría de las interacciones de los quarks, pero podemos anticipar algunos de los resultados. Se cree que la fuerza entre los quarks se genera por el intercambio de partículas llamadas gluones (el nombre procede de las referencias históricas a los piones como el “pegamento”, “glue” en inglés, nuclear). Estas

partículas transportan la carga de color entre los quarks. Aunque el hecho de que no tengan masa parecería indicar que la fuerza tendría que tener un alcance infinito, las leyes que gobiernan las cargas de color hacen imposible que un objeto como el gluón recorra más de unos 10^{-13} cm. Así, el alcance de la interacción fuerte se mantiene en el valor que ya le habíamos dado.

En la tabla siguiente se da un resumen de las cuatro fuerzas y de las partículas que las generan.

Fuerza	**Partícula**	**Spin/masa (GeV)**	**Carga eléctrica**	**Otras características**
Gravedad	Gravitón	2/0	0	Aún no detectada
Débil	Bosón vectorial	1/80	±1.0	
Electromagnética	Fotón	1/0	0	
Fuerte (hadrones)	Hadrones	Cualquiera/ 0,105 o más	Cualquiera	
Fuerte (quarks)	Gluones	1/0	0	Carga de color

SUMARIO

En la actualidad hay cuatro fuerzas fundamentales conocidas. Las fuerzas de la gravedad y del electromagnetismo son familiares en la vida cotidiana. Las dos fuerzas restantes operan a nivel subatómico y nuestros sentidos no las pueden captar de forma inmediata. Son la fuerza fuerte, responsable de mantener juntas las partes de un núcleo, y la fuerza débil, que gobierna la desintegración radiactiva. En la tabla de la página 88 se da la jerarquía de estas fuerzas, en términos de su intensidad y de la distancia a la que se puede ejercer (su “alcance”).

La tendencia histórica ha sido considerar fuerzas aparentemente distintas como meros aspectos diferentes del mismo mecanismo subyacente. Newton, por ejemplo, demostró que la fuerza de gravedad que operaba en la Tierra y la fuerza que movía los planetas eran idénticas. En la terminología moderna, decimos que "unificó” estas dos fuerzas y que creó con ello una “teoría unificada” de la gravedad. De forma similar,

las conexiones entre las fuerzas de la electricidad y del magnetismo condujeron a una teoría unificada del electromagnetismo en el siglo XIX. Una meta capital de la ciencia es producir una teoría unificada de verdad en la que todas las fuerzas se consideren iguales en esencia.

Los físicos modernos consideran las fuerzas fundamentales como un intercambio de partículas. Si nos imaginamos dos patinadores sobre hielo que se lanzan bolas de nieve mutuamente al pasar cerca uno del otro, veremos que el intercambio puede producir una desviación de la trayectoria de los patinadores, desviación que podríamos interpretar que es producida por la acción de una fuerza. A nivel subatómico ocurre el mismo proceso, y cada una de las fuerzas fundamentales está generada por el intercambio de un tipo distinto de partículas.

La ley de conservación de la energía prohíbe aparentemente este tipo de intercambio, ya que requeriría que la energía de la masa de la partícula intercambiada se creara a partir de la nada. El principio de incertidumbre, sin embargo, indica que es posible la creación de una partícula así siempre que la partícula en cuestión sea reabsorbida en un tiempo lo suficiente corto para que ninguna medición pueda detectar la violación de la conservación de la energía. Esta imposición significa que cuanto más masiva es la partícula intercambiada, más corto es el tiempo durante el que puede existir y por lo tanto más corto es el alcance de la fuerza. La fuerza entre protones y neutrones del núcleo puede considerarse que está generada por el intercambio de mesones pi y otros hadrones. La interacción débil está generada por una familia de partículas de gran masa llamadas bosones vectoriales. Los miembros de esta familia, con unas masas de unos 80 G*e*V, tienen cargas eléctricas positiva, neutra y negativa.

El electromagnetismo está generado por el intercambio de fotones, lo que explica por qué el fotón estaba en una categoría para él solo cuando clasificamos las partículas en el capítulo 4. Se cree que la gravedad se produce por el intercambio de una partícula de masa nula y spin 2 llamada gravitón. El hecho de que el fotón y el gravitón tengan masa nula explica el amplio alcance de estas dos fuerzas.

Por último, la interacción fuerte fundamental —la interacción que tiene lugar entre quarks, antes que entre hadrones— se produce por el intercambio de una familia de partículas sin masa, conocidas como gluones. Estas partículas llevan la carga de color, y las leyes que gobiernan el color garantizan que esta interacción tiene un alcance corto, a pesar de que la partícula intercambiada tenga masa nula.

En la tabla anterior se da un sumario de las fuerzas fundamentales y de las partículas cuyo intercambio las genera.

VI. LA PRIMERA UNIFICACIÓN MODERNA

Cañones a su derecha,
cañones a su izquierda...

ALFRED, LORD TENNYSON
«La carga de la Brigada Ligera»

EL PAPEL DE LA SIMETRÍA EN LA FÍSICA

Los físicos modernos no piensan siempre de una manera convencional. Uno de los grandes cambios que han ocurrido en el siglo XX es el papel cada vez más importante que se ha asignado al concepto de simetría. Desde el estudio de los sólidos hasta el desarrollo de la teoría de campo unificado, el lenguaje de la simetría se usa en todas partes.

En la naturaleza hay muchas estructuras simétricas; un copo de nieve es un buen ejemplo de ello. La simetría de un copo de nieve es evidente para todo el mundo, pero ¿qué es exactamente esa simetría? La mejor forma de contestar esta pregunta es observar que si cogemos un copo de nieve y lo hacemos girar 60° (o 120°, o 180°), el resultado no se distingue del copo de nieve en su orientación original. Decimos que la forma del copo de nieve es invariante bajo rotaciones de múltiplos de 60°.

La manera apropiada de describir una simetría así en términos matemáticos es mediante la utilización de una disciplina llamada teoría de los grupos. Un grupo es un concepto matemático pero, para nuestros propósitos, nos basta con saber que la teoría de los grupos ha desarrollado un lenguaje bastante misterioso para describir las simetrías. Hemos dicho que el copo de nieve puede hacerse girar en ángulos múltiplos de 60° sin que cambie su aspecto. Un matemático convertiría este enunciado en: «El copo de nieve es invariante bajo el grupo C_6.» Ambas afirmaciones son completamente equiva-

lentes, pero el lenguaje matemático proporciona una manera más general y concisa de hablar de las simetrías.

Otra simetría no tan obvia de modo intuitivo es la asociada con un gran depósito esférico de agua o aire. Un observador situado en el centro de tal depósito vería exactamente lo mismo sin importar la forma en qué girara. Diremos que esta situación es invariante bajo cualquier rotación en tres dimensiones, puesto que las orientaciones arriba, abajo y a los lados son completamente equivalentes por lo que se refiere al observador. El grupo que da cuenta de esta situación se denomina *O*(3), que es el grupo de las rotaciones en tres dimensiones. Lo que choca a nuestra intuición es el hecho de que el depósito de agua o de aire represente un nivel mucho más alto de simetría que el copo de nieve. Para comprenderlo, recordemos que el depósito no cambia de aspecto si se hace girar un ángulo arbitrario (p. ej., 47°), pero el copo de nieve sí.

El aspecto central del papel de la simetría en la física puede definirse de la siguiente manera: existe una simetría si al realizarse un determinado tipo de cambio no se produce ningún efecto mensurable en el sistema que se está estudiando. El hecho de hacer girar el copo de nieve implica, por supuesto, un cambio, pero éste no afecta en él nada que podamos medir. Por esta razón era tan evidente la simetría del copo de nieve.

Hasta ahora hemos hablado de simetría en términos de estructura. Sin embargo, es un concepto muy general que se puede aplicar también a otras cosas. Por ejemplo, se puede hablar de la simetría de una fuerza. La fuerza de gravedad ejercida por el Sol no depende de la dirección en que esté situado el objeto atraído, sino sólo de la distancia entre dicho objeto y el Sol. Si lo situáramos en otro lugar pero mantuviéramos constante su distancia del Sol, la fuerza de gravedad no cambiaría. Es posible imaginar esta operación si suponemos que el cuerpo está adherido a una esfera inmensa centrada en el Sol y hacemos girar esta esfera. Puesto que ninguna rotación cambia la fuerza gravitatoria, decimos que la gravedad es invariante bajo las rotaciones en tres dimensiones.

Un imán no tiene esta simetría. La fuerza ejercida por un imán sobre un objeto situado encima de su polo norte es diferente de la que se ejercería si estuviera encima de su polo sur. Por lo tanto, la fuerza ejercida por un imán no es invariante bajo las rotaciones en tres dimensiones.

La conexión entre las simetrías de las estructuras y las simetrías de las fuerzas es, a menudo, muy sutil. Por ejemplo, los átomos de oxígeno e hidrógeno que constituyen el copo de nieve serían completamente simétricos si los consideráramos individualmente. De modo similar, la fuerza eléctrica que gobierna el comportamiento de los átomos es, igual que la gravedad, simétrica bajo las rotaciones. Sin embargo, cuando dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno se unen en el proceso de oxidación, los electrones de cada átomo se desplazan en respuesta a la presencia de los demás, y el resultado neto es que la molécula de agua se forma tal como se indica en la figura 15. Esta molécula es claramente no simétrica bajo una rotación arbitraria en tres dimensiones, a pesar de que sí lo son cada uno de sus componentes y la fuerza que gobierna su comportamiento. El ángulo de 120° de la estructura de la molécula de agua es, por supuesto, lo que determina en último término la forma y el grado de simetría del copo de nieve.

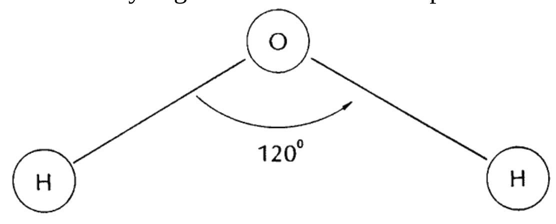


Fig. 15

Decimos que la simetría subyacente de los átomos queda rota cuando los átomos se reúnen para formar un copo de nieve. Dado que este proceso ocurre sin ninguna interferencia exterior, decimos que la simetría se rompe espontáneamente. La rotura espontánea de la simetría es un concepto importante en extremo en el desarrollo de la teoría del campo unificado, ya que muestra que las interacciones que gobiernan un deter-

minado fenómeno pueden ser en realidad mucho más simétricas y más sencillas que el mismo fenómeno.

Aun a riesgo de insistir demasiado en este punto, permítaseme dar otro ejemplo de rotura espontánea de simetría. La interacción de un átomo de hierro con otro no singulariza ninguna dirección particular del espacio. Es la misma cualquiera que sea la orientación de los átomos. En otras palabras, la interacción es invariante bajo el grupo *O*(3). A temperaturas altas, esta simetría de la interacción se refleja en la disposición de los átomos. Situados dentro de un conjunto de muchos átomos de hierro, observaríamos lo mismo en cualquier dirección: un conjunto de átomos, con sus imanes atómicos apuntando en direcciones al azar. (El átomo de hierro, como la mayoría de los átomos, puede imaginarse como un imán diminuto, con un polo norte y un polo sur). Sin embargo, si enfriáramos el hierro, la situación cambiaría. A una temperatura determinada, las fuerzas que actúan entre los átomos hacen que se alineen. Los polos norte de los imanes atómicos apuntan todos en la misma dirección, produciendo un campo magnético grande. Esto es lo que sucede en un imán de hierro ordinario. El punto importante es que la simetría *O*(3) original se rompe espontáneamente al formarse el imán.

Si consideramos el imán, con todos sus átomos alineados, es difícil adivinar que la interacción subyacente era en realidad simétrica bajo la rotación: el imán, por supuesto, no lo es. Si giramos el imán 90°, por ejemplo, se produce un campo magnético completamente distinto del inicial. Hay, sin embargo, una manera de poder ver la simetría básica del sistema. Si añadimos energía al imán en forma de calor, la temperatura llegará a alcanzar el punto en que se rompe la alineación de los átomos y el sistema vuelve de nuevo a ser simétrico bajo la rotación. La lección que aprendemos de este ejemplo es que a veces es posible ver las simetrías ocultas de un sistema observándolo a energías muy altas. Los efectos de la rotura de simetría espontánea desaparecen y queda restaurada la simetría original.

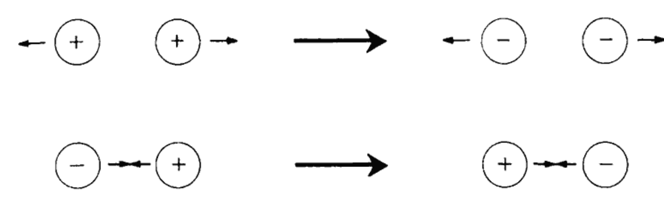


Fig. 16

Hasta el momento sólo hemos hablado de simetrías de tipo geométrico, las asociadas con las rotaciones en el espacio. Sin embargo, el concepto de simetría utilizado en física es mucho más general. Hay muchas clases de simetría que no se pueden expresar simplemente como rotaciones, pero no dejan de ser reales por ello. Por ejemplo, si tenemos dos cargas eléctricas positivas como en la figura 16, se ejercerán mutuamente una fuerza repulsiva. Si las cambiamos por cargas negativas, la fuerza no se verá afectada. Seguirá siendo repulsiva y con el mismo valor que tenía antes. Si hubiéramos empezado con una carga positiva y otra negativa y hubiéramos invertido las cargas, la fuerza tampoco habría cambiado. La conclusión es que hay una simetría fundamental en las leyes de la electricidad que indica que los efectos eléctricos permanecen inalterados si cambiamos las cargas positivas por negativas y viceversa dondequiera que aparezcan en el sistema. Esta simetría no puede representarse fácilmente por una rotación en el espacio, pero puede tratarse matemáticamente en términos de grupos.

Otro ejemplo de simetría abstracta, similar a la simetría de las cargas eléctricas, lo proporciona el concepto de interacción fuerte producida por el intercambio de mesones entre las partículas del núcleo. Si se revisan los argumentos del principio de incertidumbre del capítulo 5, se ve que, en lo que concierne a la fuerza fuerte, no hay ninguna diferencia si la partícula emisora del mesón es un protón o un neutrón. Si sólo consideramos la interacción fuerte, es evidente que no importa si cambiamos los protones en neutrones; la fuerza asociada con el intercambio de mesones no cambia. La “rotación” implicada en el cambio de un protón en un neutrón es una

idea abstracta que no hay que tratar de imaginarse como la rotación de una pelota en el espacio corriente. En lugar de esto es una rotación en un espacio abstracto llamado espacio de spin isótropo. Por lo tanto, decir que las interacciones fuertes son invariantes si intercambiamos protones y neutrones equivale a decir que son invariantes bajo las rotaciones en el espacio de spin isótropo. En el lenguaje de la teoría de los grupos, decimos que son invariantes bajo el grupo *SU*(2) en ese espacio[4]. Ésta es una terminología que volveremos a encontrar más tarde.

LAS TEORÍAS GAUGE

Un tipo particularmente importante de simetría abstracta recibe el nombre de simetría gauge. Este tipo de simetría fue concebido cuando se reflexionaba acerca de unas situaciones en las que era posible cambiar la escala de longitudes de un sistema. Una de estas situaciones sería la de un mundo situado en una lámina de caucho elástico, que al ser estirada o comprimida se estiraría o se comprimiría la distancia entre dos puntos. Resultaba que algunas teorías eran invariantes bajo este tipo de transformación y que sus predicciones no dependían de si la lámina estaba estirada o no. Puesto que la distancia se mide con una galga, se dice que estas teorías son invariantes bajo las transformaciones de galga (en inglés, gauge) y se denominan teorías gauge, para abreviar. Igual que en el caso de los otros tipos de simetría que hemos visto, los conceptos asociados con las transformaciones gauge pueden definirse de modo abstracto y aplicarse a sistemas que no tienen nada que ver con una lámina elástica de caucho.

Empecemos nuestra exposición con un experimento sencillo. En un laboratorio situado al nivel del mar, levantamos un peso de 1 kg a 3 m de altura, y medimos la cantidad de energía consumida por nuestro aparato para conseguirlo. Luego

[4] Las letras *SU* significan *especial unitario* (en inglés, *special unitary*) *y* se refieren a las propiedades técnicas del grupo.

trasladamos nuestro equipo de laboratorio a una ciudad de la montaña a una altitud de 1.000 metros y repetimos el experimento. De momento, ignoremos el hecho de que la fuerza real de la gravedad decrece ligeramente al alejamos del centro de la Tierra y supongamos que se necesita la misma fuerza para levantar el peso a 1.000 metros de altitud que al nivel del mar. No hay ninguna diferencia entre levantar el peso entre los 0 y los 3 metros y levantarlo entre los 1.000 y los 1.003 metros; la cantidad de energía que se necesita es la misma. Esto se ilustra en la figura 17. Este resultado representa otra simetría de la naturaleza.

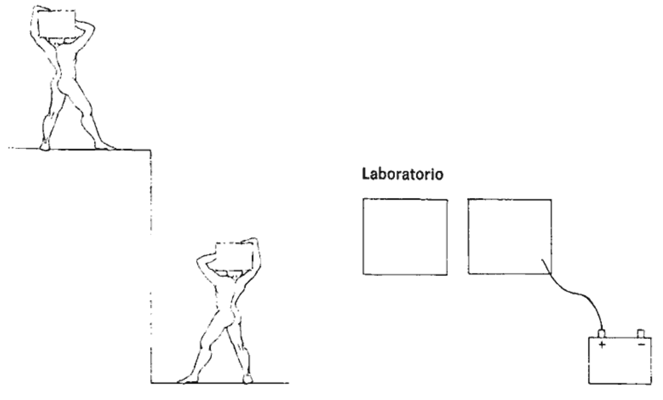


Fig. 17

Con las fuerzas eléctricas puede observarse el mismo tipo de efecto. Si realizamos un experimento eléctrico y después lo repetimos tras conectar todo el laboratorio a un polo de una batería gigantesca, tal como se muestra a la derecha de la figura 17, no habrá ningún cambio perceptible. Elevar el voltaje de todo lo del laboratorio es equivalente a cambiar la altitud en nuestro ejemplo anterior. Lo único importante es la diferencia de voltaje entre los puntos y no el valor absoluto del voltaje. Se había visto a menudo una comprobación sorprendente de lo que decimos, aunque quizá no se haya interpretado como tal: un pájaro puede ponerse encima de un cable eléctrico no aislado sin quedar electrocutado, aunque el cable

sea de alta tensión y esté a 67.000 V o más. La razón es que, aun cuando las dos patas del pájaro están a 67.000 V, la diferencia de voltaje entre ellas es cero, por lo que no fluye corriente alguna.

Esta clase de transformación, que equivale a redefinir lo que se entiende por nivel cero de altura o voltaje, es el tipo más sencillo de transformación gauge. Es un ejemplo de lo que los físicos llaman simetría global; para que opere, tenemos que elevarlo todo a la misma altura o al mismo voltaje. Por ejemplo, si sólo se levantara la mitad del laboratorio a una altura de 1.000 metros, habría diferencias claras entre los sistemas, que se podrían descubrir fácilmente tratando de andar desde un lado del laboratorio al otro. El hecho de que la electricidad presente esta simetría nos permite descartar una gran cantidad de teorías posibles. No podríamos aceptar, por ejemplo, una teoría que estableciera que la fuerza eléctrica depende de algún modo del voltaje absoluto en un punto, en lugar de la diferencia de voltaje entre dos puntos.

Este tipo de simetría refleja en realidad una intuición profundamente enraizada que tenemos de la naturaleza. En la naturaleza nada debe depender de la predisposición mental de la persona que la observa. La altura que yo escojo como cero es completamente arbitraria y puede variar de un observador a otro. El requerimiento de la simetría gauge es simplemente el hecho de que cualquier observador debe observar la misma fuerza de gravedad, sin importar lo que él defina como cero de altura. Al avanzar hacia teorías gauge más complejas, ésta será nuestra guía: en la naturaleza, nada puede depender de definiciones arbitrarias que pueden variar de un observador a otro.

Existe una versión más enfática de este principio. Hemos visto que somos libres de establecer de modo arbitrario el cero de altura o de voltaje, pero una vez establecido en un punto del espacio, debemos seguir con esta definición en todas partes. Es lo que se denomina simetría gauge global. Supongamos, sin embargo, que es posible imaginar un sistema en el que seamos libres de establecer el cero de voltaje arbitrariamente en cada punto del espacio, con independencia

de lo que se ha hecho en los puntos vecinos. Si se pudiera construir una teoría así, obedecería a una simetría gauge local en lugar de global. Es evidente que ni la gravitación newtoniana ni la electricidad ordinaria son teorías que contengan una simetría local, puesto que ambas sólo permiten escoger un cero para todo el espacio. Sin embargo, si consideramos la .base filosófica de la simetría gauge, deberíamos empezar a considerar por qué el potencial eléctrico en el punto *A* tiene que depender de la definición arbitraria del cero por alguien en el punto B. Una teoría que tuviera una simetría gauge local no dependería de las definiciones arbitrarias de un único observador, y la definición de un observador sería totalmente independiente de la de otro.

Una forma de comprender la diferencia entre las simetrías global y local es hacer una reflexión acerca de los meridianos de longitud de la superficie terrestre. Por convenio, todo el mundo está de acuerdo en que se asigne el valor cero a la línea que pasa a través del Greenwich Observatory, cerca de Londres, y que se midan todas las demás longitudes en relación a Greenwich. Si se cambiara este convenio y se asignara el cero a algún otro lugar (p. ej., Tokio o Chicago), no habría ninguna diferencia en ninguna cantidad mensurable. La distancia entre Nueva York y Londres seguiría siendo de 74° de longitud, sin que importara lo que llamamos cero. La distancia entre dos puntos cualesquiera seguiría siendo la misma cantidad de grados y todo lo que cambiaría sería el punto cero a partir del cual se miden todas las longitudes. Éste es un ejemplo de simetría global.

Por otra parte, si permitiéramos que cada persona escogiera su propio cero de longitud, la situación sería más complicada. Si quisiéramos calcular la diferencia de longitud entre Londres y Nueva York en este caso, tendríamos que tomar el valor que un observador en cada lugar hubiera asignado a su longitud y restar. Si ambos observadores habían insistido en designar su localidad como el cero de longitud, nuestro cálculo daría el resultado de que la distancia entre ambas era de cero grados, conclusión claramente errónea. Por lo tanto, el sistema de medida en la superficie terrestre es un ejemplo de

algo que presenta una simetría gauge global, pero no local. Esto demuestra que encontrar algo con una simetría gauge local puede ser más fácil de decir que de hacer.

La electricidad, como la longitud y la gravedad newtoniana, presenta una simetría gauge global, pero no local. El punto clave de nuestra discusión, sin embargo, es que el cambio global del cero de altura o de voltaje no altera la fuerza eléctrica o gravitatoria que se ejerce sobre un cuerpo. El cambio de la definición no produce ningún cambio mensurable en el mundo. Si sólo consideramos la electricidad, es evidente que no podemos fijar arbitrariamente el cero de voltaje en dos puntos distintos sin cambiar la fuerza que experimentaría una carga eléctrica. Por lo tanto, la electricidad por sí misma no muestra una simetría gauge local. Sin embargo, si recordamos la conexión íntima entre electricidad y magnetismo, podemos plantear otra pregunta: ¿es posible que los cambios en el mundo producidos al hacer una transformación gauge local para la electricidad puedan compensarse por los cambios inducidos al hacer lo mismo para el magnetismo? En otras palabras, ¿es posible que la electricidad y el magnetismo, ninguno de los cuales presenta una simetría gauge local considerados por separado, puedan confabularse de una forma tal que produzcan una teoría que sí presenta esta simetría?

Resulta que esto es lo que sucede precisamente en la teoría clásica de Maxwell del electromagnetismo. Los cambios en el potencial eléctrico producidos por un cambio arbitrario del cero en cada punto del espacio pueden ser anulados exactamente mediante un cambio apropiado del potencial magnético. En otras palabras, aunque variemos arbitrariamente un potencial, siempre podemos ajustar el otro de forma que no haya ninguna consecuencia observable, ni fuerzas que cambien, ni trayectorias que se alteren. Esto representa una generalización importante de la idea de simetría gauge asociada a unos cambios en la definición del nivel cero de altura o de voltaje.

Tal vez el resultado más importante que hay que destacar de esta discusión es que, mientras que ni la electricidad ni el magnetismo por sí solos tienen una simetría gauge local, sí la

tiene la teoría unificada del electromagnetismo, ya que en dicha teoría la parte de los efectos eléctricos que violan la simetría se compensa por los efectos magnéticos y viceversa. Resulta así que la unificación no sólo es hermosa intelectualmente, sino que nos da teorías simétricas de añadidura. Para no ser incompletos, cabe decir que el hecho de que el electromagnetismo sea invariante bajo los cambios combinados eléctricos y magnéticos del tipo que hemos comentado se expresa en lenguaje matemático por "la teoría es invariante bajo las transformaciones gauge $U(1)$".

Otra forma de considerar la simetría gauge es señalar que, en realidad, en un experimento sólo podemos observar los cambios en el estado de movimiento de algunas cantidades de materia. En otras palabras, sólo podemos detectar la presencia de fuerzas cuando están en acción, y nada más. Si hay alguna forma de cambiar el sistema sin cambiar las fuerzas, situación que encontramos en nuestro laboratorio ficticio, ese cambio del sistema sería indetectable por cualquier experimento. Por lo tanto, es indiferente para la naturaleza que se haya producido el cambio o no. Nuestras teorías tienen que reflejar este hecho.

En el caso del electromagnetismo sabemos que la descripción de la simetría gauge que acabamos de dar debe quedar reflejada de alguna manera en el intercambio de fotones entre partículas cargadas. En otras palabras, la mecánica cuántica, ciencia dedicada a describir el comportamiento de las partículas elementales, tiene que contener también alguna versión de la simetría gauge. La forma en que surge esta versión es particularmente interesante. Resulta que la realización de los tipos de cambios que hemos estado describiendo en los potenciales eléctrico y magnético requiere un cambio correspondiente en la descripción de una partícula cargada por la mecánica cuántica. Si queremos que la mecánica cuántica tenga el mismo tipo de simetría gauge local que el electromagnetismo clásico, debemos imponer que no haya ningún cambio en ninguna cantidad mensurable cuando unos observadores en puntos diferentes cambien su definición de voltaje independientemente uno de otro. En el caso clásico, encontramos que la

forma de producir esta simetría local era tener dos efectos que se anulaban mutuamente.

En el caso de una fuerza generada por un intercambio, hay dos cosas que pueden cambiarse. Una, ya mencionada, es la descripción mecanicocuántica de las partículas sobre las que actúa la fuerza. La otra, que mencionamos ahora por vez primera, es la descripción mecanicocuántica de la partícula que se intercambia. Podemos plantear la cuestión de la simetría gauge local en una teoría que describe las partículas de la forma siguiente: ¿hay alguna manera de que los cambios en la descripción de las partículas cargadas y de las partículas intercambiadas se puedan anular mutuamente, dotándonos de una teoría que presente una simetría gauge local?

La respuesta es sorprendente. Resulta que esta anulación es posible, pero sólo si la partícula que se intercambia tiene una masa nula y spin 1. En este caso, y sólo en éste, se repetirá el delicado equilibrio que vimos en el caso clásico a nivel de las partículas. La partícula de masa nula y spin 1 es, por supuesto, el fotón. Este resultado es tan bello que los físicos teóricos hablan muchas veces de la propia existencia del fotón como el resultado de los requisitos de la simetría gauge.

LA UNIFICACIÓN ELECTRODÉBIL

Tenemos ahora a nuestra disposición todos los conceptos que necesitamos para comprender una cadena de sucesos que empezó a finales de los años cincuenta y culminó en la concesión del premio Nobel de física a tres físicos teóricos, en 1979. Hasta hace poco, las teorías gauge eran el reducto de unos pocos teóricos alejados de las corrientes principales de la física de las altas energías. Sólo para citar un ejemplo de esto, durante mis estudios de graduación en Stanford, a mediados de los años sesenta, sólo oí algunas referencias informales a las teorías gauge y sólo leí un artículo sobre el tema, más que nada de información básica. Los temas populares de la época, que tenían nombres como *polos de Regge* y *duali-*

dad, han desaparecido, igual que el hula hoop, y han sido reemplazados por teorías que antes habían sido descuidadas.

En los años cincuenta, una corriente oculta de pensamiento en la física teórica sustentaba que probablemente había algún tipo de conexión profunda entre las interacciones electromagnética y débil, debido básicamente a que ambas suponen el intercambio de partículas de spin 1. Se sabía que era posible construir una teoría que tuviera simetría gauge local *SU*(2). Lo que esto significaba es que se podía construir una teoría en la que era posible empezar en un punto del espacio y cambiar un neutrón en un protón (o viceversa), y luego ir al punto siguiente del espacio y volver a hacer lo mismo sin ninguna referencia a lo hecho en el primer punto.

Esto implica una ampliación considerable de la idea de simetría gauge. Empezamos con una simple transformación gauge, que era poco más que un cambio en la elección del cero. Luego pasamos a una simetría más complicada que requería una acción recíproca entre los potenciales eléctrico y magnético pero que, en última instancia, dependía aún de la definición arbitraria de los puntos cero.

La siguiente etapa en complejidad implica un tipo más abstracto de simetría, uno que es algo más difícil de imaginar.

En el capítulo 5 vimos que la fuerza entre protones y neutrones podía considerarse generada por el intercambio de un mesón. En este intercambio, no importa mucho si las partículas implicadas son protones o neutrones ya que la fuerza fuerte será la misma en ambos casos. Esta situación llevó a los físicos a hablar de simetría isótropa de la naturaleza, una simetría en la que uno se imagina que es posible redefinir la carga eléctrica de una manera muy parecida a como redefinimos el cero de altura o voltaje. Si en la naturaleza se observara esta simetría, no habría ninguna diferencia si fuéramos a un núcleo y cambiáramos todos los protones por neutrones y todos los neutrones por protones. Dado que si se hace en los núcleos reales hay en realidad poca diferencia, los físicos creen que esta operación representa una simetría, en el mismo sentido que lo es redefinir la altura cero.

Una forma de pensar en la simetría isótropa es imaginarse una aguja indicadora en cada punto del espacio. Si la aguja apunta hacia arriba, la partícula en ese punto es un protón; si apunta hacia abajo, la partícula es un neutrón. El intercambio de protones y neutrones en el interior de un núcleo corresponde por lo tanto a girar todas las agujas 180°. Donde había un protón, hay ahora un neutrón y viceversa. Si el mundo no experimenta ningún cambio con esta operación, que equivale a una redefinición de la carga eléctrica en todos los puntos del espacio, diremos que la naturaleza es invariante bajo una simetría global de spin isotópico. En la jerga matemática, la teoría presenta una simetría gauge *SU*(2) global.

A la luz de nuestra discusión anterior, la siguiente pregunta resulta obvia. ¿Puede haber una teoría en la que la simetría isotrópica sea local en lugar de global? En otras palabras, ¿es posible construir una teoría en la que el hecho de ir a través del espacio girando las agujas al azar en cada punto no produzca ningún efecto mensurable? Nuestra primera reacción a esta pregunta sería probablemente decir que esa situación no es posible. Resulta, sin embargo, que esta primera reacción es equivocada. Del mismo modo que era posible crear una simetría local en el electromagnetismo mediante la anulación de los cambios asociados a las partículas cargadas con los cambios asociados al fotón intercambiado, es posible construir una teoría en la que se pueden intercambiar protones y neutrones a voluntad en todos los puntos del espacio, y que los cambios asociados a este intercambio queden anulados por los cambios en las partículas intercambiadas para generar la fuerza. Resulta que una teoría que implique protones y neutrones tendrá una simetría gauge *SU*(2) local si las fuerzas son arbitradas por una familia de cuatro partículas sin masa y de spin 1 (algunas de ellas con carga eléctrica) cuyo intercambio genera la fuerza. En este caso, como sucedía con el electromagnetismo, los cambios en la descripción de las partículas causados por la transformación son anulados exactamente por los cambios en los objetos intercambiados, y en la teoría todo permanece tal como era al principio. Por lo tanto, para una fuerza generada por esta familia de partículas, el cambio de

protones en neutrones y los cambios sucesivos que lo acompañan en las partículas intercambiadas no tienen mayor efecto en el sistema que trasladar nuestro laboratorio desde el nivel del mar hasta 1.000 m, aproximadamente, de altura. Las predicciones de la teoría son invariantes.

Los físicos conocían muy bien este hecho desde hacía tiempo (en realidad, el único artículo que leí en los estudios de graduación fue la exposición clásica de la idea). Sin embargo, se quedó en poco más que una curiosidad, porque requería la existencia de cuatro partículas, como el fotón, dos de las cuales se suponía que tenían carga. Jamás se habían observado estas partículas en el laboratorio, así que se consideró que la teoría, aunque interesante desde un punto de vista intelectual, pudiera no tener nada que ver con el mundo real.

Sin embargo, en la medida en que la teoría podía tomarse en serio, los físicos percibieron que podía tener algo que ver con las interacciones electromagnética y débil. Ambas interacciones eran arbitradas por el intercambio de partículas de spin 1 (los fotones y los bosones vectoriales) y podía esperarse, por lo tanto, que tuvieran algunas semejanzas. El hecho de que se suponía que los bosones *W* tenían masa, mientras que las partículas predichas por la teoría no la tenían, era el punto que impedía cualquier aplicación de la teoría.

En 1967, Steven Weinberg, que estaba por entonces en el Massachusetts Institute of Technology, publicó un artículo que iba a revolucionar la física. En esencia, mostró que las teorías gauge del tipo que hemos discutido podrían describir el mundo real si se tenían en cuenta los efectos de la rotura espontánea de la simetría. En uno de esos acontecimientos que parecen demasiado increíbles para aparecer incluso en la ficción y que por lo tanto sólo suceden en la vida real, Abdus Salam realizó independientemente el mismo descubrimiento en Londres unos meses más tarde.

Hemos visto que un grupo de átomos de hierro se alinean por sí mismos en una dirección dada a baja temperatura, a pesar de que la interacción entre átomos no tenga ninguna dirección preferida en el espacio. Al hacerlo, los átomos adquieren cierta energía, y tenemos que añadir energía al siste-

ma (p. ej., en forma de calor) para romper la alineación y ver la verdadera simetría. En el caso de las interacciones débiles, la teoría predice que la simetría subyacente es tal que las cuatro partículas que se intercambian para generar la fuerza no tienen que tener masa. Lo que Weinberg y Salam demostraron es que a bajas energías se produce una rotura espontánea de la simetría y tres de las partículas intercambiadas adquieren una masa, mientras que la cuarta permanece sin masa. Es un caso análogo al del imán, donde la alineación de los átomos da al sistema una energía que no tendría si la simetría no se hubiera roto. En el caso de las partículas, esta energía añadida toma la forma de una masa para las partículas intercambiadas.

Con este desarrollo quedaba refutada una de las mayores objeciones a la teoría gauge. La teoría no predice la existencia de cuatro partículas sin masa de spin 1 a energías y temperaturas normales del mismo modo que no predice que los átomos de hierro no tengan una dirección privilegiada en el espacio a temperatura ambiente. En ambos casos, la verdadera simetría de la naturaleza queda enmascarada por los procesos de rotura espontánea de la simetría. Sólo podemos deducir lo que debe ser esa auténtica simetría gracias a nuestra teoría. La simetría espacial del hierro se rompe espontáneamente cuando la temperatura baja lo suficiente para que los campos magnéticos se alineen por sí mismos en una dirección dada. En un proceso análogo por completo a la formación de un imán, lo mismo sucede con las cuatro partículas predichas por la teoría gauge. En la naturaleza, se observa la simetría completa a energías muy altas, cuando las cuatro partículas tienen masas que son despreciables comparadas con las energías de colisión. Sin embargo, al bajar la temperatura, esta simetría se rompe espontáneamente. De la misma manera que se retiene una cierta cantidad de energía en la creación de un campo magnético a gran escala en un imán, cuando se rompe la simetría se retiene una cierta cantidad de energía en las cuatro partículas. Sin embargo, en lugar de aplicarse al campo magnético, la energía, en el caso de las partículas, se convierte en masa. Resulta que si realmente hay una simetría gauge $SU(2)$

local subyacente en la naturaleza, los efectos de la rotura espontánea de la simetría son tales que, en la era actual, no debemos esperar ver cuatro partículas sin masa en el laboratorio. La teoría predice que tres de estas cuatro partículas adquieren una masa cuando se rompe la simetría, en un proceso análogo a la manera en que el campo magnético adquiere energía cuando se forma el imán. Por razones técnicas, la cuarta partícula permanece sin masa. Por lo tanto, la teoría predice que deberíamos observar en la naturaleza una partícula sin masa de spin 1 (que podemos identificar con el fotón) y tres partículas masivas de spin 1. Dos de estas últimas deberían tener carga eléctrica, y podemos identificarlas con los bosones vectoriales cargados corrientes. La tercera partícula pesada es eléctricamente neutra y representa un nuevo tipo de partícula involucrada en las interacciones débiles, un bosón vectorial con el nombre de $Z°$. Se suponía que la masa de los bosones era del orden de 80 a 100 G*e*V.

Igual que argumentamos que la electricidad y el magnetismo eran simplemente aspectos diferentes de una misma fuerza porque ambos suponían el intercambio de la misma partícula (el fotón), la teoría de Weinberg-Salam muestra que el electromagnetismo y la interacción débil son lo mismo en tanto que surgen del intercambio de la misma familia de partículas. El hecho de que las interacciones parezcan ser tan diferentes tiene que ver con la rotura espontánea de simetría y negar esta conclusión sería como decir que la alineación de los átomos de hierro prueba que la fuerza atómica subyacente depende de la dirección. En la naturaleza hay algunas simetrías que están ocultas a la observación directa y que sólo se pueden ver a energías altas. La simetría básica de la fuerza atómica se hace evidente cuando calentamos el imán. La simetría básica de las fuerzas electromagnética y débil debería manifestarse cuando la energía disponible en las colisiones fuera suficiente para hacer irrelevante la diferencia de masa del fotón y las partículas vectoriales. En la práctica, esto significa que debemos manejar energías mayores que los 80-100 G*e*V de la masa de las partículas. En términos de las edades del Universo descritas en el capítulo 2, la temperatura al co-

mienzo de la era de las partículas, una fracción de milisegundo después del Big Bang, correspondía a sólo unos pocos gigaelectronvoltios de energía de colisión. Incluso entonces, la temperatura era demasiado baja para que se observara esta simetría y es demasiado baja en nuestro presente, una era relativamente gélida.

El resultado final de la teoría de Weinberg-Salam es, por tanto, que ha dejado de ser necesario considerar que las fuerzas débil y electromagnética sean fuerzas distintas y separadas. Dado que comprendemos ahora que están asociadas con el intercambio de la misma familia de partículas y que las diferencias aparentes entre ellas son el resultado de la rotura espontánea de simetría, podemos reducir el número de fuerzas fundamentales de cuatro a tres. La nueva fuerza, producida por el intercambio de partículas de spin 1, recibe el nombre de interacción electrodébil. Reconocemos que esta unificación es una simetría escondida en el mundo de hoy día, pero que se manifestaría en un mundo donde la energía asociada con las colisiones ordinarias excediera de los 80-100 G*e*V de la masa de las partículas vectoriales.

LA EVIDENCIA DE LA UNIFICACIÓN ELECTRODÉBIL

Después de que Weinberg y Salam publicaran sus artículos, transcurrió un período de varios años en que fueron ignorados casi por completo. Por ejemplo, hay una publicación llamada *Science Citation Index* (índice de citaciones en ciencia), que recoge el número de veces que los investigadores se refieren a una publicación dada. En los cinco años entre 1967 y 1971, el artículo de Weinberg fue citado un total de cinco veces (comparado con los cientos de veces por año en el período siguiente). Sin embargo, a partir de 1971, empezaron a aparecer en escena una serie de comprobaciones de la teoría gauge unificada. Algunas eran experimentales y otras teóricas.

Evidencia teórica

Hemos discutido la conexión entre partículas intercambiadas y fuerzas en términos de diagramas como el de la izquierda de la figura 18, donde se intercambia una única partícula. Es obvio, sin embargo, que éste no es el único proceso que puede ocurrir. En el caso del electromagnetismo, es evidente que hay muchas otras maneras en que dos partículas pueden interaccionar. Por ejemplo, una partícula podría emitir un fotón, reabsorberlo, y entonces intercambiar un fotón con la otra partícula. Este proceso se muestra en el centro de la figura 18.

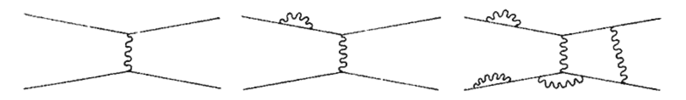


Fig. 18

Pueden ocurrir otros tipos más complicados de interacciones, uno de los cuales se muestra a la derecha de la figura 18. Puesto que, a causa del principio de incertidumbre, no podemos decir cuál de estos acontecimientos sucede en la realidad, calculamos la fuerza electromagnética sumando las contribuciones de todos los distintos tipos de diagramas y decimos que la fuerza real que observamos en el laboratorio es la suma de todas las maneras posibles en que puede ocurrir la interacción. La rama de la física que se dedica al estudio de esta clase de cálculos se llama electrodinámica cuántica (QED, del inglés, *quantum electrodynamics)* y contiene la teoría más impresionante de todas. Esta teoría predice muchas magnitudes mensurables experimentalmente con una precisión de una mil millonésima o más, precisión inigualada en cualquier otra rama de la ciencia.

Existe un problema en la idea de sumar las contribuciones de distintos tipos de procesos. Tan pronto abandonamos el intercambio de una única partícula, encontramos que las probabilidades para alguna de estas interacciones se hacen infinitas. Incluso el diagrama central de la figura 18 tiene esta característica. Uno de los grandes logros de finales de los años cuarenta consistió en demostrar que por cada infinito positivo

que surge de nuestros cálculos matemáticos, se puede encontrar un infinito negativo que lo anula. El resultado neto es que las predicciones de la QED para cualquier cosa que pueda ser medida son perfectamente finitas, y no hay ningún problema. Los infinitos se producen por nuestra manera de hacer matemáticas, no por ningún efecto físico. Las teorías en las que los infinitos se pueden anular de esta forma se dice que son renormalizables. La QED es un ejemplo de estas teorías.

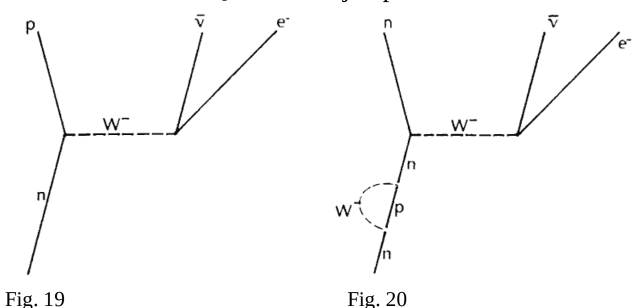


Fig. 19 Fig. 20

La teoría original de las interacciones débiles no tenía esta propiedad. Debido a que las interacciones débiles que se habían observado antes de 1967 eran todas similares a la desintegración del neutrón, en el sentido de que implicaban el intercambio de bosones vectoriales cargados, se creía que sólo había dos partículas con masa que intervenían en la interacción débil, el W^+ y el W^-. La desintegración del neutrón tenía lugar tal como se indica en la figura 19. Si seguimos la QED, veremos que hay otras formas de desintegración del neutrón (en la fig. 20 se muestra una de ellas). Igual que en la QED, las gráficas más complicadas dan lugar a infinitos pero, a diferencia de la QED, estos infinitos no se pueden eliminar. Mientras en nuestros cálculos incluyamos sólo las partículas vectoriales cargadas, la teoría de las interacciones débiles no es renormalizable. Esto significa que la teoría debe predecir que algunas magnitudes implicadas en las interacciones débiles son infinitas, resultado que simplemente no tiene sentido. No hay infinitos en el laboratorio.

Las teorías gauge, sin embargo, predicen la existencia de una tercera partícula masiva implicada en las interacciones débiles, la $Z°$. En 1971, el físico holandés Gerard t'Hooft (por entonces un estudiante graduado) mostró que la adición de $Z°$ proporcionaba el tipo justo de infinitos que eliminaban los generados por el W^+ y el W^- y que la teoría que incluía a los tres era renormalizable. En palabras de un comentarista, este desarrollo «reveló que la rana de Weinberg y Salam era un príncipe encantado.» El $Z°$, lejos de ser una complicación adicional, era justamente la pieza del rompecabezas que faltaba y que solucionaba además un problema teórico viejo y muy difícil del proceso. Fue en este momento cuando los físicos de las altas energías empezaron a subirse al carro de la teoría gauge.

Evidencia experimental

La predicción de un tercer mesón vectorial tiene consecuencias importantes para los físicos experimentales. Lo primero que se investigó fueron las interacciones iniciadas por neutrinos. Es posible obtener haces de neutrinos en aceleradores de alta energía mediante la creación de un haz de partículas, como los mesones pi o mu, cuyos productos de desintegración contengan neutrinos y luego dirigir este haz contra una gran pila de tierra. Las partículas iniciales se desintegran y la tierra lo absorbe todo excepto los neutrinos. El resultado es un haz puro de neutrinos que permite estudiar sus interacciones con blancos seleccionados.

Si un neutrino choca con un protón y si sólo existen bosones vectoriales cargados, entonces el neutrino tiene que cambiar de identidad. En la figura 21 se muestra un ejemplo de este tipo de interacción. En las interacciones que implican el intercambio de mesones vectoriales cargados, se tiene que producir siempre un mesón mu o un electrón junto con los restos del protón. Sin embargo, si existe un $Z°$, podemos tener una interacción como la de la figura 22, donde los restos no van acompañados por ningún leptón cargado. En 1973, unos grupos que trabajaban en el Fermi National Accelerator Laboratory, cerca de Chicago, descubrieron acontecimientos de

esta clase. Su trabajo se vio pronto confirmado por experimentadores del Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN) en Ginebra. En el experimento se observó (aunque indirectamente) la partícula *Z*° anunciada por las teorías gauge y se obtuvo una prueba importante a favor de la teoría.

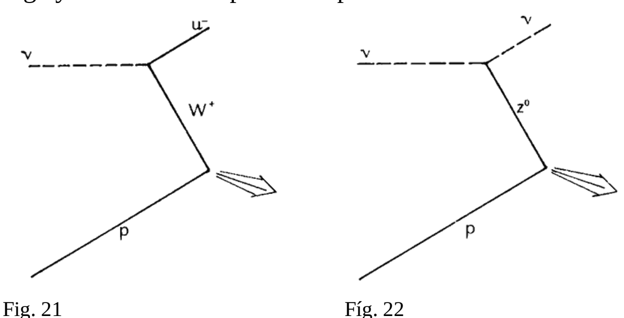


Fig. 21 Fíg. 22

La teoría también hacía predicciones sobre numerosos procesos en los que intervenía la interacción débil, todos los cuales dependían de un número que podía calcularse a partir de la teoría. Por diversas razones técnicas e históricas, este número se expresó mediante un ángulo, conocido como ángulo de Weinberg. La teoría asignaba a este ángulo un valor de unos 22° y fundadas en este valor se podían hacer toda clase de predicciones sobre procesos que abarcaban desde *interacciones* de alta energía hasta la emisión de radiación por los átomos. Durante el período entre 1973 y 1979 tuvieron lugar batallas encarnizadas entre los experimentos y la teoría sobre si estas predicciones eran correctas. Se hacían experimentos que parecían contradecir la teoría, se reformaba la teoría para que estuviera de acuerdo con el experimento, se repetía el experimento y se obtenían nuevos resultados, se volvía a reformar la teoría, y así sucesivamente. Cuando se disipó la polvareda y todos los resultados experimentales concordaron, se confirmaron las predicciones de la teoría original.

Así, en 1982, sólo faltaba realizar una importante confirmación experimental de la teoría: el aislamiento e identificación de los propios bosones vectoriales. Había, tal como hemos visto, una evidencia indirecta de la existencia de la partí-

cula neutra, y los físicos confiaban en que las tres podrían observarse en el laboratorio. En cierto sentido, el hecho de encontrar los mesones vectoriales no era tanto una prueba de la teoría gauge como una prueba de la idea de que en la interacción débil intervenía el intercambio de una partícula. Todas las teorías de las interacciones débiles predicen la existencia del W^+ y del W^-; el único elemento nuevo de las teorías gauge es la adición del $Z°$. La confirmación de esta idea fundamental se retrasó durante mucho tiempo por una razón muy simple. Si las masas de las partículas son realmente del orden de 80-100 G*e*V, como sugieren las teorías actuales, se necesita una gran cantidad de energía para crearlas en los aceleradores. Puesto que toda la energía que va a parar a la masa de estas partículas debe proceder de la energía de los protones acelerados, los aceleradores deben ser realmente muy potentes si queremos tener alguna probabilidad de ver los mesones vectoriales.

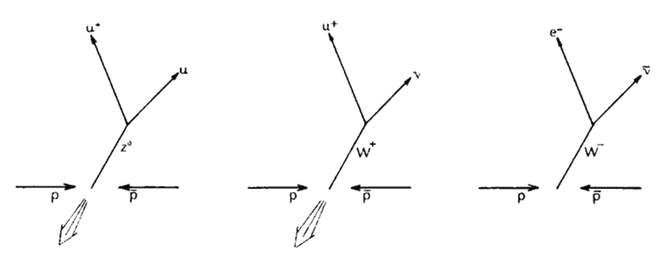


Fig. 23

De hecho, hasta la primavera de 1981 no se puso en marcha en el CERN una máquina capaz de producir partículas vectoriales. En esta máquina colisionan frontalmente haces de protones y antiprotones, cada uno con una energía de 540 G*e*V. En la figura 23 se muestran algunas de las posibles reacciones que podrían resultar de estas colisiones. En cada caso, se produce un mesón vectorial, que vive su corta existencia y se desintegra. La partícula no se puede ver de manera directa porque su tiempo de vida es demasiado corto. El trabajo del experimentador es buscar electrones o muones con la

energía correcta para haber sido producidos por la desintegración del mesón vectorial.

El 13 de enero de 1983, en un congreso en Roma, Carlo Rubbia de la Harvard University anunció la primera evidencia del descubrimiento de un bosón vectorial. Rubbia era el director de un grupo que trabajaba en el CERN en Ginebra[5]. El grupo de Rubbia encontró seis casos en los que se observaban electrones como los esperados según el diagrama de la derecha de la figura 23. En todos estos casos, tal como se esperaba, sus detectores no pudieron registrar la cantidad de energía y momento que debía llevar el neutrino que acompaña al electrón. (El aparato era de tal especie que el neutrino no se observaba en absoluto.) La masa del bosón *W* cargado deducida de los seis casos era de 81 ±5 G*e*V. Esto hay que compararlo con la predicción teórica de 82,1 ±2,4 G*e*V. Además, la teoría predecía que se observarían 4,9 casos del tipo que se habían detectado. Fundándose en estas comparaciones, se puede decir sin temor a equivocarse que el bosón vectorial ya ha sido observado en el laboratorio.

UNA IMAGEN SENCILLA DE LA UNIFICACIÓN

Dado que la unificación de las fuerzas juega un papel extremadamente importante en la evolución primitiva del Universo, resulta útil tener en mente una imagen sencilla del proceso de unificación. En la página 88 discutimos la idea de fuerza como un intercambio de partículas en términos de una analogía de dos patinadores que se lanzaban algo mutuamente al pasar. Supongamos que consideramos de nuevo esta analogía, pero imaginemos ahora dos conjuntos de patinadores. En una pareja, uno lanza un cubo de agua al otro, lo cual induce la aparición de una fuerza. La otra pareja también se inter-

---

[5] Carlo Rubbia, junto con Simon van der Meer, también del CERN, fueron galardonados por este descubrimiento con el premio Nobel de Física de 1984 (N. *del T).*

cambia un cubo de líquido, pero, en este caso, el líquido es alcohol en lugar de agua.

Mientras la temperatura externa esté por encima de los 0°C, ambas fuerzas parecerán casi iguales. La deflexión ocasionada por ambos líquidos no será demasiado diferente, y no nos sentiríamos incómodos al decir que las dos fuerzas son idénticas. Sin embargo, cuando la temperatura desciende por debajo de los 0°C, el agua se hiela mientras que el alcohol no. En este caso, una pareja de patinadores se intercambia alcohol líquido, la otra, un bloque de hielo. La fuerza sería muy diferente en este caso. En este ejemplo, encontramos que dos fuerzas que aparecen muy diferentes a bajas temperaturas se revelan idénticas a altas temperaturas. La unificación de las fuerzas electromagnética y débil puede imaginarse de manera muy parecida.

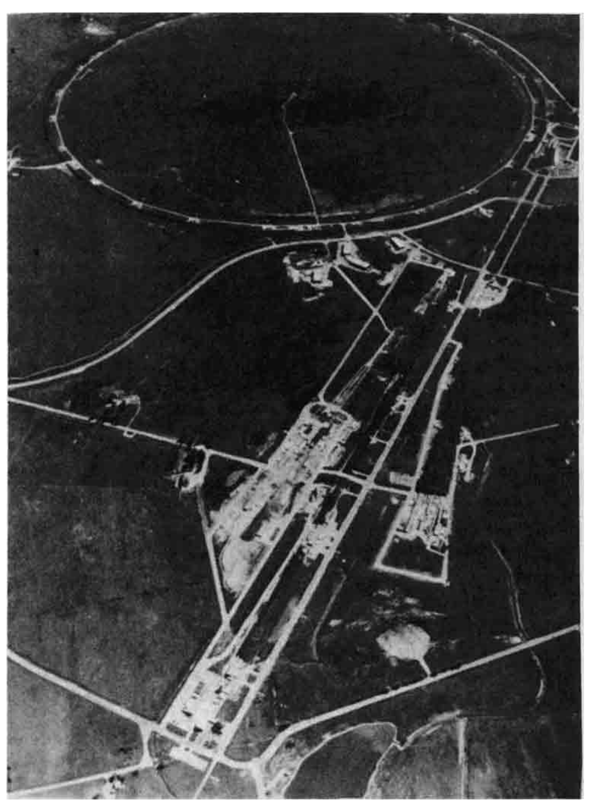
SUMARIO

En la física moderna la idea de simetría juega un papel importante en extremo. Existe una simetría en la naturaleza si la realización de determinados tipos de cambios no afecta ninguna cantidad mensurable del sistema estudiado. Una simetría fácil de visualizar es la que se produce al hacer girar 60° un copo de nieve.

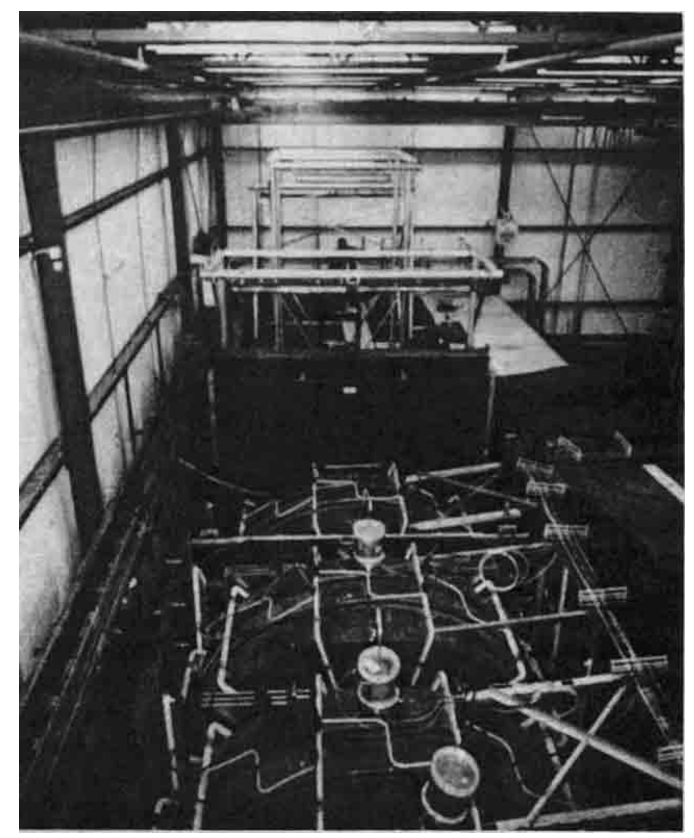
Las simetrías pueden ser sutiles. La fuerza que actúa entre dos átomos de hierro, por ejemplo, no singulariza ninguna dirección especial del espacio, pero cuando los átomos de hierro forman un imán, hay una dirección “norte' bien definida. La interacción entre los átomos representa una simetría oculta de este sistema, una simetría que no es evidente para el observador. Cuando una interacción produce un efecto como el de un imán, decimos que la simetría subyacente se ha roto espontáneamente.

Las llamadas simetrías gauge son importantes en la física moderna. En el electromagnetismo, es posible cambiar el potencial eléctrico (el voltaje) de un sistema de una manera del todo arbitraria en cualquier punto del espacio sin alterar

ninguna cantidad mensurable, siempre que, en compensación, se altere el potencial magnético de cada uno de los puntos. En la jerga de los matemáticos, el electromagnetismo es "invariante bajo una transformación gauge $U(1)$". A nivel de las partículas elementales, esa propiedad del electromagnetismo funciona de esta manera: los cambios en la descripción de las partículas cargadas debidos a cambios en los potenciales se compensan exactamente por los cambios en la descripción del fotón que se intercambia.



Vista aérea del Fermi National Accelerator Laboratory en Batavia, Illinois (E.U.A.). El círculo mayor es el acelerador principal, que mide seis kilómetros y medio de circunferencia. Hay tres áreas experimentales que se extienden tangencialmente desde el acelerador. *Foto Fermilab.*



Parte del equipo del Experimento n.° 1A en el que se observó por vez primera la corriente neutra en el Fermilab. *Foto Fermilab.*

En 1967 se produjo un adelanto importante. Se publicó una teoría en la que la transformación gauge tomaba la forma de la capacidad de transformar protones en neutrones, y viceversa, de manera totalmente arbitraria en cualquier punto del espacio. Igual que en la electricidad, los efectos debidos a este cambio pueden compensarse por cambios en las partículas que se intercambian. La simetría subyacente es tal que deben intercambiarse cuatro partículas sin masa para generar la fuerza, pero los efectos de la rotura espontánea de simetría

hacen que tres de esas partículas adquieran una masa del orden de 80-100 G*e*V, mientras que la cuarta permanece sin masa. Las tres partículas pesadas se identifican con los bosones vectoriales que intervienen en la interacción débil, mientras que la partícula sin masa se identifica con el fotón. Esta teoría unifica las fuerzas electromagnética y débil, puesto que ambas se consideran como el resultado de intercambios de la misma familia de partículas. El hecho de que las dos fuerzas parezcan diferentes en la actualidad es una consecuencia del hecho de que no hay suficiente energía disponible en las colisiones para permitir que se observe la simetría subyacente. Cuando la temperatura sea tal que se disponga de energías de 80-100 G*e*V, ambas fuerzas serán idénticas. En cualquier caso, este desarrollo reduce el número de fuerzas fundamentales de cuatro a tres, y la fuerza combinada recibe el nombre de *electrodébil*. Desde 1971 se ha acumulado una gran cantidad de evidencia, tanto teórica como experimental, que confirma la noción de la unificación de estas dos fuerzas. En la página 127 se da una forma fácil de visualizar esta unificación.

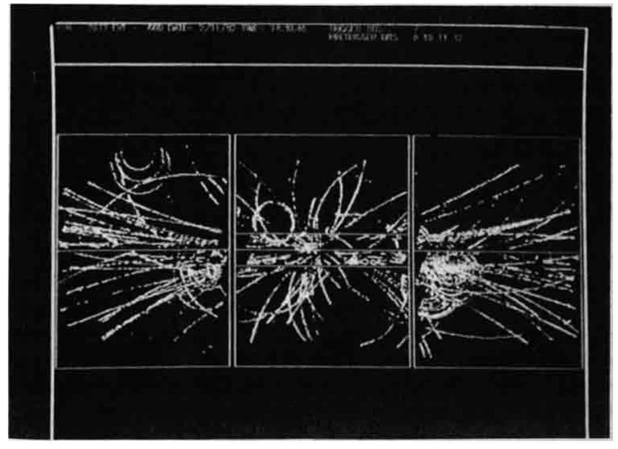


Foto tomada durante el experimento del mesón vectorial en el CERN, en Ginebra. Los rastros marcan las trayectorias seguidas por las partículas elementales en el aparato. *Foto cortesía del CERN.*

VII. LA GRAN UNIFICACIÓN

Un científico es un hombre que puede descubrir algo, y *nadie en el mundo tiene la manera de probar si realmente lo descubrió o no,* y *que cuantas* más cosas puede llegar a *imaginar que nadie pueda descubrir, más gran científico es.*

WILL ROGERS

CROMODINÁMICA CUÁNTICA

La lección más importante que podemos deducir del éxito maravilloso de la unificación de las interacciones electromagnética y débil es que era correcta la intuición que nos decía que había algo equivocado en un Universo gobernado por cuatro teorías diferentes. Hemos visto que la idea de simetrías escondidas en la naturaleza puede invocarse para reducir este número a tres, y cabe preguntarse si el mismo proceso no bastaría para reducirlo a dos o incluso a una. Los teóricos no desdeñaron, por supuesto, esta posibilidad y desde principios de los años setenta dedicaron un enorme esfuerzo a producir una unificación adicional, a través del uso de las técnicas gauge. El esfuerzo fue fructífero, y tenemos ahora una teoría en la que la fuerza fuerte está unificada con la electrodébil. Luego veremos cómo funciona la teoría, pero, antes de que podamos hablar de unificar la teoría de la fuerza fuerte con algo, tenemos que comprender lo que es esa teoría.

Ya hemos visto que la fuerza fuerte fundamental actúa entre quarks y que, además de su carga eléctrica ordinaria, estos quarks llevan un tipo de carga que hemos llamado color. La teoría que describe la interacción entre las cargas eléctricas de las partículas a través del intercambio de un fotón se llama electrodinámica cuántica. El término *electrodinámica* indica que consideramos los efectos electromagnéticos, y el término *cuántica* indica que tratamos con partículas. Por analogía, la

teoría que se ha desarrollado para describir la interacción fuerte —una interacción en la que interviene la carga de color de los quarks— se denomina cromodinámica cuántica (QCD, del inglés *quantum chromodynamics),* con el prefijo cromo para referirse al color. Es una teoría similar al electromagnetismo corriente, pero más complicada. Tal como veremos, esta similitud facilita la unificación de la fuerza fuerte con la electrodébil.

La idea de que las partículas puedan llevar una carga eléctrica nos resulta familiar. Hay dos tipos de carga eléctrica, que llamamos positiva y negativa. En el curso normal de las cosas, las partículas se agrupan en átomos de forma tal que cada átomo contiene tantas cargas positivas como negativas. Otra manera de describir este hecho es señalar que, según las leyes que gobiernan la carga eléctrica, las partículas cargadas se agrupan formando estructuras que son eléctricamente neutras.

Ocurre un fenómeno similar cuando examinamos la carga de color de los quarks. En lugar de dos tipos de carga, hay tres, que llamaremos rojo, azul y verde. Debemos recordar que aquí no se usa el término *color* en el sentido corriente. Decir que un quark determinado es verde, sólo es una manera rápida de expresar que el quark tiene el tipo de carga que, de modo arbitrario, hemos llamado verde; es análogo a decir que el quark es positivo cuando queremos decir que tiene una carga eléctrica positiva.

La razón básica de que los protones y los electrones formen átomos eléctricamente neutros es que, de acuerdo con la ley de la fuerza eléctrica, las cargas iguales se repelen entre sí y las cargas distintas se atraen. Como cabía esperar, las leyes que gobiernan la carga de color son algo más complejas a causa de la existencia de tres tipos de carga en lugar de dos. Sin embargo, sucede que sólo hay dos situaciones en que la fuerza de color sea atractiva. La fuerza entre un quark con un color dado y el antiquark con el anticolor es atractiva, y la fuerza entre tres quarks, ninguno de los cuales tenga el mismo color, también es atractiva. Cualquier otra combinación produce una fuerza repulsiva.

Si recordamos la estructura de quarks de las partículas elementales, nos daremos cuenta de que la primera situación (quark más antiquark) es lo que llamamos un mesón, mientras que la segunda (tres quarks) corresponde a un barión. Por lo tanto, el hecho de que el único tipo de partículas de fuerte interacción sean los mesones y los bariones queda reflejado en términos de la carga de color mediante esta regla de la fuerza.

El término *color,* aunque no se refiere a ningún atributo pigmentario de las partículas, proporciona sin embargo una regla mnemotécnica útil para este tipo de carga. Hay tres tipos de carga de color en los quarks y hay tres pigmentos primarios. Puede obtenerse cualquier color de pintura mezclando azul, verde y rojo en proporciones adecuadas. Si mezclamos cantidades iguales de estos tres pigmentos obtenemos el blanco, la ausencia de color. De manera parecida, hay tres pigmentos llamados substractivos, porque absorben los colores primarios cuando se añaden a una mezcla. Son el cyan (un color azul verdoso que absorbe el rojo), magenta (que absorbe el verde) y amarillo (que absorbe el azul). La adición de un pigmento a su complemento substractivo (p. ej., rojo al cyan) produce el blanco.

En términos de esta analogía (y no me canso de repetir que es sólo una analogía), la ley para la fuerza entre los quarks resulta muy sencilla. Los quarks sólo pueden reunirse en conjuntos cuando el color resultante sea blanco. Si consideramos que el blanco no tiene color o es de color neutro, existe una analogía exacta entre la carga de color y la eléctrica, ya que los objetos cargados eléctricamente también forman sistemas estables si la combinación final es eléctricamente neutra. En la figura 24, se muestran el pión cargado positivamente y el protón en términos de los colores de los quarks. Adviértase que, en realidad, aparecerá una carga eléctrica dada en tres quarks, cada uno con una carga de color distinta. Así, lo que hemos llamado quark de tipo *u* (carga eléctrica 2/3) es en realidad tres partículas distintas: un quark u rojo, un quark *u* azul y un quark *u* verde.

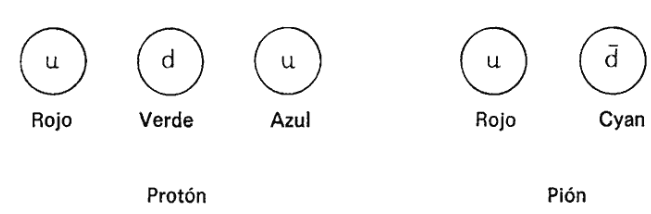


Fig. 24

Vimos que la manera de producir una teoría gauge de las interacciones débiles era considerar las simetrías relacionadas con la alteración de las cargas eléctricas en puntos distintos del espacio. Al tratar de los quarks, el tipo análogo de simetría implicará las cargas de color en lugar de las eléctricas. Siguiendo el procedimiento de Weinberg y Salam, exigimos que no cambie ninguna cantidad mensurable cuando en un sistema alteremos al azar los colores de los quarks ("Dejaré este rojo, cambiaré este azul por verde, cambiaré este verde por rojo, dejaré este azul..."). Naturalmente, si sólo hiciéramos esto, la teoría no podría ser invariante, ya que cambiar el color de un quark en su protón eliminaría su "blancura". Como en el caso de la teoría de Weinberg-Salam, los cambios en las propiedades mecanicocuánticas de los quarks causados por esta operación deben ser anulados por cambios compensatorios de las propiedades mecanicocuánticas de las partículas intercambiadas entre los quarks, partículas que hemos llamado gluones. Para que ocurra esta anulación, debe haber ocho partículas de éstas. Todas son partículas sin masa, de spin 1 y, mientras que son eléctricamente neutras, tienen carga de color. Cada gluón tiene un color y un anticolor, aunque el color y el anticolor no son necesariamente miembros de una pareja en correspondencia. Por ejemplo, hay un gluón que tiene la carga roja y antiverde, otro la azul y antirroja, etc.

El intercambio de gluones entre los quarks mantiene unidas las partículas elementales, del mismo modo que el intercambio de fotones entre electrones y protones mantiene unido al átomo. La única diferencia real es que los intercambios son un poco más complicados en el caso de las interacciones fuertes ya que los quarks tienen que cambiar su carga de color

cuando emiten un gluón. La figura 25 muestra un proceso de intercambio en un protón. Los tres quarks van juntos hasta que el quark rojo emite el gluón con los colores rojo y antiverde (magenta). Este gluón alcanza el quark verde, donde las cargas verde y antiverde se anulan una a otra y deja al quark con una carga neta roja. El intercambio del gluón ha intercambiado así la carga de color de los dos quarks, pero ha dejado el sistema global con la combinación correcta que da el blanco (el color neutro). Se observará, en este ejemplo, que la carga de color, igual que la carga eléctrica, se conserva en todas las etapas de la interacción. Cuando se emite el gluón, una carga roja entra en la interacción con el quark y la abandona con el gluón, mientras que la verde del quark final es anulada por la antiverde del gluón. Éste es otro ejemplo de la analogía tan estrecha entre la carga de color y la carga eléctrica.

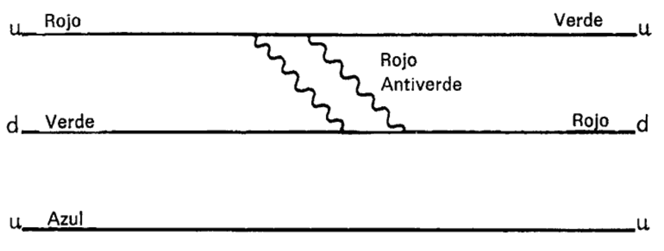


Fig. 25

EL CONFINAMIENTO DE LOS QUARKS

Uno de los mayores problemas conceptuales de la teoría de las interacciones fuertes que acabamos de describir es el simple hecho de que nunca se ha visto ningún quark en el laboratorio. (Hay una posible excepción, que discutiremos en el capítulo 12.) Si todos los hadrones están compuestos por quarks, es difícil comprender el porqué de esta situación; después de todo, sabemos que los átomos están compuestos por núcleos y electrones y siempre vemos núcleos y electrones libres. La única manera en que los quarks pueden haber

evadido las búsquedas intensas a que han sido sometidos es que, por alguna razón, sólo puedan existir dentro de las partículas y no pueden hacerlo como entidades libres. Esta propiedad se llama confinamiento, dado que los quarks están confinados dentro de las partículas. Resulta que hay una manera muy natural de explicar el confinamiento en términos de intercambio de gluones. En el transcurso de esta explicación, descubriremos también una forma válida de describir todo el proceso de la gran unificación.

La mejor forma de abordar el confinamiento es considerar una analogía electromagnética. Si tenemos una carga eléctrica ordinaria situada en el espacio, sabemos que el principio de incertidumbre permite la creación de un par electrón-positrón en el espacio a su alrededor, tal como se muestra en la figura 26. El único requerimiento es que este par se recombine y se aniquile en un tiempo suficientemente corto para satisfacer aquel principio. Este tipo de aparición y desaparición sucede continuamente en el vacío.

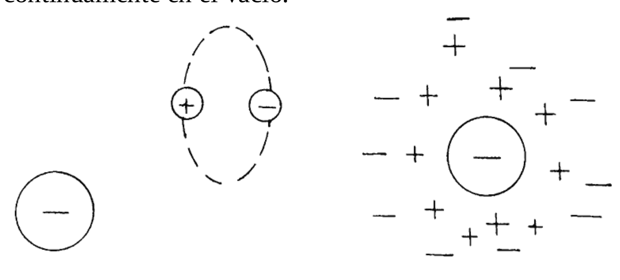


Fig. 26 Fig. 27

Cerca de una carga ordinaria, las fuerzas eléctricas actuarán sobre el par virtual durante su breve vida. Si la carga original es negativa, el positrón tenderá a ser atraído hacia ella y el electrón tenderá a ser repelido. Puesto que la creación y aniquilación de pares virtuales es un proceso continuo, podemos imaginamos la carga original rodeada por una nube de pares electrón-positrón virtuales, tal como se muestra en la figura 27. Por término medio, esta nube de partículas cargadas se dispondrá de manera que la parte de la nube más cer-

cana a la partícula estará cargada positivamente mientras que la parte más alejada será negativa.

Imaginemos ahora que otra partícula cargada, como un electrón, se acerca a este sistema partícula-nube. Si el electrón permanece lejos, el sistema se parecerá a una carga eléctrica ordinaria. Sin embargo, si el electrón tiene una velocidad alta, penetrará en el sistema y se abrirá camino dentro de la nube. Cuanta mayor sea la energía del electrón, más profundamente podrá penetrar. Por lo tanto, si queremos describir la interacción electrón-partícula a altas energías, tendremos que reflexionar acerca de qué tipo de fuerza actúa sobre el electrón una vez está dentro de la nube. Hay que considerar dos fuerzas, la asociada con la carga negativa original y la asociada con la parte positiva de la nube cerca de esa carga. Ambas tenderán a anularse mutuamente, con la nube positiva que atrae el electrón y la carga original que lo repele. Por tanto, la fuerza total sobre el electrón será menor que la que ejercería la partícula original sola. Decimos que la nube positiva escuda la carga de la partícula estacionaria. En lo que concierne a la partícula incidente, la situación es exactamente la que se produciría si la carga negativa original tuviera un valor menor del que realmente tiene.

Cuanto más profundo se penetra en la nube, más carga positiva se deja atrás y menos carga positiva queda por delante escudando la carga estacionaria. Por lo tanto, aumenta la fuerza total ejercida sobre el electrón por la carga original y la nube. Cuanta mayor sea la energía del electrón, más profundamente penetra; y cuanto más profundamente penetra, más intensa es la fuerza repulsiva que experimenta. Es como si alguien incrementara la carga de la partícula estacionaria a medida que el electrón se acerca a ella. La intensidad efectiva de la fuerza eléctrica, en otras palabras, aumenta a medida que se incrementa la energía del electrón. Debe subrayarse que este efecto no tiene nada que ver con cambios en ninguna carga real, sino con el hecho de que la nube virtual alrededor de la partícula cargada puede escudar parte de la carga de esa partícula.

Una vez establecido este punto para el electromagnetismo, podemos utilizar la misma técnica para discutir las interacciones fuertes. Cualquier quark estará rodeado por una nube de pares quark-antiquark virtuales. Si el quark original es verde, entonces cabe esperar que un par virtual verde-antiverde se disponga de forma que el miembro antiverde del par esté cerca del quark original. Por lo tanto, nuestro primer impulso es decir que el efecto de escudo debería ser el mismo aquí que para el electromagnetismo y que la carga de color efectiva de un quark debería aumentar al incrementarse la energía de colisión.

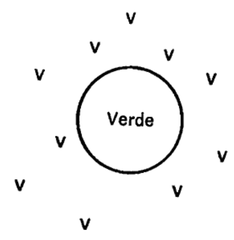


Fig. 28

Sin embargo, para las interacciones fuertes hay un nuevo factor importante a tener en cuenta. Además de la nube de quarks y antiquarks, habrá una segunda nube superpuesta de gluones virtuales. Por supuesto, existe una nube análoga de fotones virtuales alrededor de una carga eléctrica, pero como los fotones no tienen carga eléctrica, esta nube no produce ningún efecto. No obstante, en el caso de la interacción fuerte, los gluones virtuales de la nube tienen carga de color y por tanto deben tomarse en cuenta al hablar de la intensidad efectiva de la interacción. Resulta que la nube de gluones virtuales produce en la partícula incidente el efecto exactamente opuesto al de la nube de quarks y antiquarks. Produce una especie de efecto "anti-escudo", que aumenta la carga de color del quark original en lugar de disminuirla. Este efecto puede considerarse que lo produce la parte verde del gluón al ser "atraída" hacia el quark verde original. El efecto neto de las dos nubes superpuestas se muestra en la figura 28. El quark verde original está rodeado por una nube de partículas

virtuales, cuya parte de color verde es la que se encuentra más próxima al quark.

Otro quark que se acerque a este sistema con una energía alta penetrará en la nube. Al acercarse más al quark original (es decir, al aumentar su energía) ve cada vez menos parte verde de la nube. En consecuencia, ve que la carga de color efectiva de quark original se hace cada vez más pequeña. Por lo tanto, a diferencia del electromagnetismo, puede esperarse que la interacción verde sea cada vez menos intensa a medida que aumenta la energía con la que colisionan las partículas.

Este resultado tiene dos consecuencias muy importantes. Por una parte, significa que cuando dos quarks están cerca uno del otro, tal como se encuentran en las partículas ordinarias, cada uno pasa la mayor parte del tiempo dentro de la nube virtual del otro. Por lo tanto, interaccionan entre sí de la manera más débil que es posible que interaccionen. Esta propiedad, conocida como libertad asintótica de los quarks, significa que podemos imaginar los quarks en un protón como tres canicas que se mueven en un recipiente, con poca interacción.

Por otra parte, si un quark intenta escapar del protón, verá que la carga de color del sistema que deja atrás aumenta cada vez más al tratar de seguir su camino hacia fuera. Puede imaginarse el quark como si estuviera atado a su posición original con una goma elástica suelta. Mientras se mueve libremente dentro del protón no sucede nada. Pero si trata de escapar, es estirado hacia atrás con tanta más fuerza cuanto más se aleja. De hecho, la naturaleza de la nube de gluones es tal que ningún quark ligado a una partícula puede ser arrancado de ella. Por esta razón decimos que el quark está confinado en la partícula y hablamos del principio de confinamiento de los quarks. Este principio explica por qué no se observan quarks en el laboratorio, puesto que no puede liberarse ningún quark de una partícula elemental.

LA GRAN UNIFICACIÓN

La QCD nos proporciona, pues, una teoría de la interacción de los quarks que satisface el principio de la simetría gauge aplicado a la carga de color. La siguiente cuestión que planteamos es si puede unificarse esta interacción con la fuerza electrodébil utilizando técnicas análogas a las presentadas en el capítulo anterior. Resulta que la respuesta a esta pregunta es positiva, aunque la forma concreta en que debe realizarse la unificación es aún objeto de debate entre los teóricos.

A pesar de todo, resulta fácil describir el esquema general. La interacción subyacente en las tres fuerzas (fuerte, electromagnética y débil) muestra una simetría gauge, que nos permite cambiar las cargas eléctricas y de color a voluntad en puntos diferentes del espacio. Dado que ahora estamos hablando de combinar las interacciones débil y fuerte, tenemos que ampliar esta simetría y permitir que los quarks se conviertan en leptones y viceversa, exactamente de la misma manera.

Para compensar estas alteraciones, tiene que haber una familia de partículas cuyo intercambio sea el responsable de la fuerza unificada. Los cambios en estas partículas intercambiadas anularán con exactitud los cambios en las partículas originales y dejarán invariante la teoría. En la versión simétrica de la teoría, todas las partículas intercambiadas serían de masa nula. Sin embargo, a causa del fenómeno de rotura espontánea de la simetría, algunas de estas partículas intercambiadas tendrán en realidad una masa, igual que los bosones vectoriales en la unificación de las fuerzas electromagnética y débil.

El debate teórico mencionado antes está relacionado con la simetría exacta que sigue esta teoría de la gran unificación (GUT, del inglés *grand unified theory*). Esta cuestión aún no está resuelta, aunque los resultados generales producidos por cualquier teoría son claros. Para ser más concretos, describiré aquí una de las teorías más sencillas de la gran unificación. (El lector que lo desee puede tener presente que la teoría real que se desarrolle finalmente puede comprender algunos tipos más de partículas.)

La fuerza básica que opera en esta teoría de la gran unificación está condicionada por una familia de veinticuatro partículas sin masa, de spin 1. Estas partículas tienen el mismo papel en la gran unificación que el de las cuatro partículas sin masa de spin 1 en la unificación electrodébil. De hecho, cuatro de estas partículas se identifican con los cuatro bosones electrodébiles, mientras que ocho más se identifican con los gluones responsables de la fuerza fuerte. Las restantes doce partículas se denotan con la letra X y representan un conjunto nuevo de partículas. Las partículas X tienen carga de color y carga eléctrica de ±1/3 o ±4/3. Por lo tanto, hay X rojo, verde y azul con carga 1/3, los mismos colores con carga –1/3, etc. Además, estas partículas X tienen la propiedad de que pueden cambiar un quark en un leptón y viceversa. En otras palabras, un proceso como el que se muestra en la figura 29, donde una partícula X se combina con un quark y produce un electrón, es posible en la teoría de la gran unificación, aunque no estaría permitido según las ideas tradicionales de la física de las partículas. Este aspecto de la teoría de la gran unificación es muy importante en términos de las predicciones que hace la teoría acerca de magnitudes que se pueden comprobar de modo experimental.

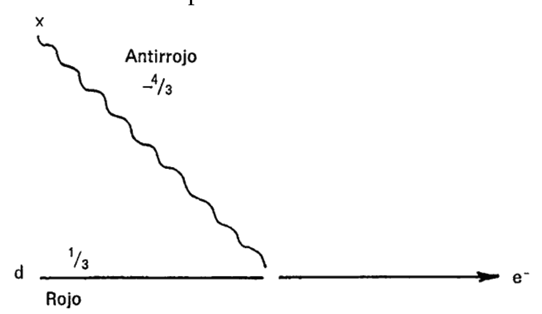


Fig. 29

En el capítulo 6, vimos que el proceso de rotura espontánea de la simetría convertía una parte de la energía del sistema en masa, igual que el proceso análogo en el hierro convierte parte de la energía en campos magnéticos a gran escala.

En el caso de las doce partículas X, éstas adquieren una masa fantástica, 10^{15} G*e*V, o sea, mil billones de veces la masa del protón y aproximadamente la masa de una célula de sangre humana. La idea de que pueda haber partículas de masa macroscópica pero tamaño microscópico ha provocado, tal como veremos más tarde, la reconsideración de viejas ideas de la física.

Cuando la energía de las colisiones entre las partículas es superior a 10^{15} G*e*V, el hecho de que X tenga masa y los gluones no, se vuelve irrelevante y se pone de manifiesto en la naturaleza la simetría subyacente del sistema. Cuando la energía está por debajo de este punto, se observa los efectos de la rotura espontánea de la simetría y la fuerza fuerte aparece con un carácter muy distinto de la electrodébil. A modo de referencia, la masa de 10^{15} G*e*V se llama *masa de la gran unificación* y la energía correspondiente, *energía de la gran unificación.*

Las energías por debajo de la energía de la gran unificación son todavía muy grandes comparadas con la masa de los bosones vectoriales, por consiguiente, aunque la energía haya descendido por debajo de los 10^{15} G*e*V, no aparecerá ningún efecto debido a la diferencia de masa entre el fotón y los bosones vectoriales. La simetría asociada con la fuerza electrodébil se manifestará en la naturaleza hasta que la energía de las colisiones descienda por debajo de unos 100 G*e*V, punto en el que las tres fuerzas que intervienen en la gran unificación aparecen distintas.

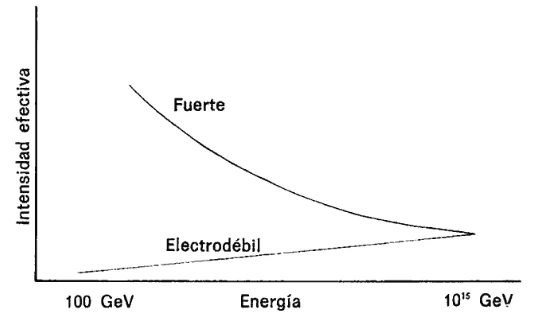


Fig. 30

Hay otra forma de considerar la gran unificación. Vimos antes que a medida que aumentaba la energía de la interacción, cambiaba la carga efectiva de las partículas a causa de la presencia de nubes virtuales. Podemos representar estos cambios en un gráfico como el de la figura 30. La constante de acoplamiento electrodébil, de modo muy parecido a la carga eléctrica, aumenta lentamente con la energía de las colisiones, mientras que la intensidad de la interacción fuerte disminuye.

Las dos constantes de acoplamiento que representan las intensidades de ambas interacciones se acercan lentamente una a otra y pasan a ser iguales en la energía de unificación. Así, podemos considerar que la unificación es el punto donde las intensidades de las fuerzas se hacen iguales, así como el punto donde todas las partículas intercambiadas para generar la fuerza tienen masas pequeñas comparadas con la energía de colisión.

El hecho más sorprendente de este gráfico (y de la gran unificación en general) es la enorme disparidad entre las energías a las que se producen las dos unificaciones. Por ejemplo, en la figura 30 hemos tenido que comprimir la escala de energías para que el gráfico cupiera dentro de la página. Si lo hubiéramos dibujado todo a escala, el punto en el que se juntan las dos curvas estaría situado más allá de la órbita de Marte. La teoría parece señalar que, una vez se alcanzan unos 100 G*e*V, no se puede esperar que suceda nada interesante en la física de las partículas hasta alcanzar la energía de unificación. Los físicos llaman a esta vasta y aburrida región de energías el gran desierto asintótico. La razón de que las dos unificaciones ocurran a energías tan radicalmente diferentes es un problema fundamental de la física teórica y, por el momento, nadie tiene idea de cómo se puede resolver.

CONGELACIONES SUCESIVAS

Hemos utilizado repetidas veces la analogía de la formación de un imán o un copo de nieve para hablar de las sime-

trías en la naturaleza. La analogía nos da también una forma muy atractiva de visualizar la unificación de las fuerzas. Cuando se produce una congelación, pensamos normalmente en un reordenamiento de la materia que constituye el sistema. Un copo de nieve, por ejemplo, se forma cuando las moléculas de agua quedan bloqueadas en un cristal rígido, y un imán, cuando los átomos de hierro quedan bloqueados de forma alineada. La materia del sistema permanece prácticamente igual que estaba; lo que cambia es sólo la interacción entre fragmentos de esa materia.

Sin embargo, desde el punto de vista de la simetría, la descripción de la congelación y la descripción de la unificación son muy cercanas y parecidas. El agua líquida es la misma sin importar lo que la hagamos girar o giremos nosotros mismos. Sin embargo, el agua helada sólo es invariante si se le da un giro equivalente a algún múltiplo de 60°. Por lo tanto, el proceso de congelación puede considerarse como un proceso en el que se reduce la simetría del sistema. De un sistema en el que no hay ninguna dirección privilegiada (es decir, un sistema de alta simetría) a 1°C, el agua pasa a un sistema en el que hay direcciones privilegiadas muy definidas (un sistema de baja simetría) a –1°C.

Resulta fácil ver el proceso análogo de unificación de las fuerzas. Por encima de la energía de unificación, las fuerzas están unificadas. Es una situación de alta simetría en lo que concierne a las fuerzas. Por debajo de la energía de unificación hay una diferenciación de las fuerzas y el sistema tiene una simetría menor. Podemos pues considerar el proceso como la “congelación” de dos fuerzas separadas a partir de la fuerza original unificada. La única cosa que hay que tener en cuenta es que éste es un tipo de congelación abstracto y que no supone una reordenación de la materia.

En términos de este modelo, podemos considerar que las fuerzas fuerte, débil y electromagnética son análogas a tres fluidos diferentes, por ejemplo, agua, alcohol y mercurio. A temperaturas altas, los tres materiales serán fluidos y diremos que el sistema tiene un alto grado de simetría. Sin embargo, al bajar la temperatura, esta simetría no sobrevive. A 0°C, se

helará el agua, mientras que el mercurio y el alcohol seguirán líquidos. Esto corresponde a la “congelación” de la fuerza fuerte a 10^{15} G*e*V. Por debajo de los 0°C tenemos una simetría mucho más baja en nuestro sistema: dos de los materiales son aún líquidos, pero el tercero es un cristal y aparece por completo diferente de sus compañeros. A –40 °C se helará el mercurio. Esto corresponde a la “congelación” de la fuerza débil a 100 G*e*V. Por debajo de este punto se pierde por completo la simetría del sistema original. Dos de los materiales son ahora sólidos con una estructura muy diferente, mientras que el tercero sigue siendo líquido. Un observador que vea esta configuración final difícilmente se dará cuenta de la similitud básica de los tres materiales, y no obstante esta similitud básica se manifiesta por encima de los 0 °C. De la misma manera, ahora observamos las fuerzas fuerte, débil y electromagnética y las percibimos del todo diferentes unas de otras, y sin embargo a energías muy altas nuestras teorías nos indican que tienen que ser idénticas.

LA PRUEBA FINAL DE LA TEORÍA DE LA GRAN UNIFICACIÓN

Las energías que intervienen en la teoría de la gran unificación son tan altas que no hay esperanzas de que se puedan reproducir en nuestros laboratorios en un futuro predecible. Por consiguiente, tenemos que basamos en pruebas indirectas para encontrar una comprobación experimental de la teoría.

La propiedad más sorprendente de la GUT es la predicción de que a una energía muy alta es posible cambiar los quarks en leptones y viceversa a través de la mediación de las partículas X. Esto significa que las partículas constituidas por quarks, como los protones y los neutrones, serían inestables. Sería posible convertir uno de los quarks en un leptón (electrón, positrón o neutrino) y provocar la desintegración espontánea del protón. Dado que la masa de la partícula X es tan alta, suponemos que este proceso es muy poco probable pero, a pesar de todo, la teoría predice que debería ocurrir. Puesto

que ninguna otra teoría hace una predicción tan sorprendente, la medida de la estabilidad del protón resulta ser una prueba importante de la idea de la gran unificación. La búsqueda de la desintegración del protón es una empresa tan crucial en esta etapa de nuestro conocimiento que dedicaremos todo el capítulo 8 a una descripción detallada de los esfuerzos teóricos y experimentales que se han dedicado a ello. De momento, señalaremos que, a pesar de que la masa de la gran unificación está, por supuesto, fuera de nuestro alcance, podemos, sin embargo, poner a prueba la idea de la gran unificación en nuestros laboratorios aquí y ahora.

SUMARIO

Es posible avanzar una etapa más en el proceso de la unificación de las fuerzas fundamentales. A mediados de los años setenta, se desarrolló una teoría de las interacciones fuertes. Se denomina cromodinámica cuántica (el prefijo *cromo* se refiere a que la interacción fuerte fundamental depende de la carga de color de los quarks y *cuántica* al hecho de que se trata de partículas). En esta teoría, la fuerza fuerte procede del intercambio entre los quarks de partículas sin masa llamadas gluones. A diferencia de los fotones, que intervienen en la interacción entre partículas cargadas eléctricamente pero ellos mismos no tienen carga eléctrica, los gluones tienen carga de color. A causa de ello, unas deducciones sencillas nos llevan a la conclusión de que la fuerza entre dos quarks se hace cada vez más intensa a medida que aumenta la separación entre ellos. Por lo tanto, un quark que trate de abandonar una partícula elemental encontrará que tiene que superar una resistencia creciente. La consecuencia de este hecho es que los quarks están "confinados" dentro de las partículas y no se pueden ver aislados. Esto explica la imposibilidad de verlos en el laboratorio.

La unificación de las fuerzas electrodébil y fuerte tiene lugar del siguiente modo: a energías muy altas, cuando la simetría subyacente del sistema se manifiesta en la naturaleza, la

fuerza fuerte-electrodébil procede del intercambio de veinticuatro partículas. En el caso perfectamente simétrico, todas estas partículas son de masa nula. Sin embargo, la rotura espontánea de la simetría provoca que doce de ellas (llamadas partículas X) tengan una masa de unos 10^{15} G*e*V. Esta masa recibe el nombre de masa o energía de la gran unificación. A unas energías mucho mayores que ésta, podemos ignorar la masa del X y decir que todas las veinticuatro partículas que se intercambian tienen esencialmente masa nula. En este caso, veríamos las fuerzas como si fueran idénticas. A unas energías por debajo de los 10^{15} G*e*V, observamos los efectos de la rotura espontánea de la simetría y percibimos la fuerza fuerte como algo diferente de la electrodébil.

Las restantes doce partículas sin masa son los ocho gluones, que intervienen en la interacción entre los quarks, los tres bosones vectoriales, que intervienen en la interacción débil, y el fotón, que interviene en la interacción electromagnética. Decimos que las fuerzas están unificadas porque en este modelo las tres fuerzas proceden del intercambio de la misma familia de partículas. El proceso a través del cual se separan las fuerzas al disminuir la energía de las interacciones es análogo a una serie de congelaciones, y se recomienda al lector que lea la sección titulada «Congelaciones sucesivas» para poder comprender esta imagen.

Las partículas X tienen la propiedad de que cuando son absorbidas por un quark, lo transforman en un leptón y viceversa. Por lo tanto, motivan la predicción más importante de las teorías de la gran unificación: que los protones son inestables. El capítulo 8 tratará de este concepto con detalle.

VIII. LA DESINTEGRACIÓN DEL PROTÓN

También sirven quienes sólo permanecen y *esperan.*

JOHN MILTON
“Sobre su ceguera"

El aspecto más asombroso de la teoría de la gran unificación (GUT) puede que no sea su belleza intelectual y su simplicidad, sino las predicciones que hace acerca de la estabilidad a largo plazo de la materia. Y más sorprendente aún que estas predicciones teóricas, es la posibilidad de probar, por medio de experimentos que se están realizando ahora mismo, si son ciertas o no. Estos experimentos son importantes no sólo porque nos proporcionan una manera de probar el concepto global de la gran unificación, sino porque son una forma de aprender algo del destino final del Universo. Porque la verdad es que las teorías que hemos estado discutiendo hacen una predicción sin ninguna ambigüedad: toda la materia, incluso aquellas formas que nos parecen permanentes, es en esencia inestable y acabará por desintegrarse.

LA ESTABILIDAD DE LA MATERIA

Por nuestro conocimiento de las partículas elementales, sabemos que sólo hay unas pocas de ellas que se puedan calificar de *estables.* La inmensa mayoría de partículas conocidas se desintegran en otras partículas en períodos de tiempo lo bastante cortos para que podamos detectar y medir el proceso de desintegración. Desde los isótopos de vida larga del uranio hasta el más evanescente hadrón, la regla que parece regir es que si es posible que una partícula o un núcleo se desintegre (es decir, que la desintegración sea consistente con otras leyes de la naturaleza), se desintegra.

Hay pocas leyes que pongan restricciones a la desintegración. Las más importantes son la conservación de la energía y la conservación de la carga eléctrica. La primera de ellas dice sencillamente que la energía de la masa y del movimiento de los productos de desintegración tiene que ser igual a la energía encerrada en la masa de la partícula original. A modo de ejemplo, esto implica que los productos de desintegración de una partícula no pueden tener una masa mayor que la propia partícula. La segunda ley opera de forma muy parecida: establece que la carga eléctrica debe ser la misma antes y después de una desintegración dada, y excluye, por ejemplo, la desintegración de una partícula cargada positivamente en un conjunto de partículas cuya carga eléctrica neta sea cero.

Estas dos condiciones garantizan que el electrón no se puede desintegrar, ya que no hay ninguna partícula o conjunto de partículas que tenga a la vez una masa menor que el electrón y una carga eléctrica negativa. Sin embargo, no implican que lo mismo deba ser cierto para el protón, puesto que hay muchas combinaciones de partículas con una masa menor y cargadas positivamente. Si sólo tuviéramos estas dos restricciones, sería posible en teoría que ocurriera la reacción:

$$p \rightarrow e^- + \pi^\circ$$

Que hasta el momento ninguna teoría haya considerado nunca una reacción como ésta no es porque sea imposible lógicamente, sino más bien porque los protones parecen ser tan estables como el electrón. Esto ha llevado a los físicos a añadir la ley de la conservación de los bariones a las leyes de conservación de la energía y de la carga, pero esta ley ha sido siempre como algo añadido “a mano”. Mientras que en la naturaleza hay muchos fenómenos que no pueden explicarse sin la conservación de la energía y de la carga eléctrica, el fenómeno más importante “explicado” por la conservación estricta de los bariones es la estabilidad aparente del protón. Si debe conservarse el número de bariones en una interacción y el protón es el barión más ligero, se deduce de ello que el protón no se puede desintegrar.

Una medida de la estabilidad del protón es una cantidad llamada su tiempo de vida, que es el tiempo que tarda en desintegrarse alrededor de 2/3 de una muestra dada de protones. A partir del hecho de que el Universo aún existe después de unos 15.000 millones de años de haberse producido el Big Bang, sabemos que el tiempo de vida del protón no puede ser muy inferior a 10^{10} años. Es un tiempo de vida largo, pero no extraordinariamente largo. El uranio 238 tiene una vida media de unos 5.000 millones de años. Pero tal como ha señalado Maurice Goldhaber, de los Brookhaven National Laboratories, sabemos "por nuestros propios huesos" que el tiempo de vida del protón tiene que ser considerablemente más largo que la edad del Universo. El cálculo para confirmarlo es sencillo. Un ser humano promedio tiene unos 10^{28} protones en su cuerpo. Si el tiempo de vida del protón fuera de sólo 10^{10} años, nuestros protones se estarían desintegrando a un ritmo de 30.000 millones por segundo. En este caso, cada uno de nosotros sería una fuente radiactiva con una intensidad de 1 curie y produciría tanta radiación como un puñado de material del núcleo de un reactor nuclear. Siguiendo en esta línea de razonamiento, si exigimos que el cuerpo sea menos radiactivo que los trazadores médicos, podemos concluir que el tiempo de vida del protón tiene que ser como mínimo de 10^{16} años, un millón de veces la edad del Universo. Como referencia, si el tiempo de vida del protón fuera realmente de 10^{16} años y una persona estuviera viva desde el Big Bang, habría perdido más o menos unas tres centésimas de gramo de peso corporal a causa de la desintegración de los protones de su cuerpo.

Este tipo de argumentos sencillos revela por qué el protón se considera estable por regla general; en realidad, sabemos que debe tener una vida muy larga. También revela que los métodos normales de investigar la desintegración de partículas, muchos de los cuales suponen el seguimiento de una partícula individual hasta que se desintegra, no funcionan en el caso del protón. Tendríamos que esperar demasiado tiempo. La alternativa es observar una gran cantidad de protones con la esperanza de pillar a uno de ellos en el proceso de desintegración. Por ejemplo, si un protón tarda 10^{16} años en

desintegrarse (como promedio), en un conjunto de 10^{16} protones, se desintegrará uno cada año (como promedio).

Este tipo de argumento sobre el tiempo de vida del protón también ilustra otro punto importante. En cualquier determinación de esta cantidad, tiene que haber algún método para detectar los productos de la desintegración. Hasta ahora, hemos usado en nuestra discusión el propio cuerpo humano como "detector" y hemos señalado que, si el nivel de radiación fuera tan alto como el que correspondería a un tiempo de vida del protón de 10^{16} años, tendríamos que estar todos muertos de cáncer inducido por la radiación. El hecho de que el lector esté leyendo este libro es una evidencia de que su detector no ha absorbido radiación a ese nivel.

Por supuesto, hay detectores de radiación mucho más sensibles que el cuerpo. Si fuera posible colocar instrumentos en el cuerpo para que dieran una lectura instantánea de la radiactividad, podríamos tener un límite mucho más preciso (y más alto) del tiempo de vida del protón. Aunque no lo podemos hacer en el cuerpo, sin duda podemos hacerlo en un objeto inanimado como un litro de agua. Dado que la lógica de esto es típica de todos los experimentos de desintegración del protón, procederemos con cierto detalle.

Un protón, o un neutrón, tiene una masa de $1{,}67 \times 10^{-27}$ kg. Un litro de agua tiene una masa de 1 kg y, puesto que la masa de cualquier objeto material está constituida casi por completo por la masa de los protones y neutrones que contiene, llegamos a la conclusión que debe haber $1/(1{,}67 \times 10^{-27}) = 6 \times 10^{26}$ protones y neutrones en un litro de agua[6]. Si el tiempo de vida del protón fuera de 10^{16} años, deberíamos esperar que los protones del agua se desintegraran a un ritmo de 6×10^{10} desintegraciones por año, es decir, unas 2.000 por segundo. Si ponemos unos cuantos contadores Geiger en el agua, tendrían

[6] Sería sin duda una buena idea aclarar una posible fuente de dificultades en este punto. Hemos hablado de forma amplia de "la desintegración del protón", pero, tal como veremos en seguida, tanto los protones como los neutrones reunidos en núcleos pueden sufrir el proceso de desintegración que predice la GUT Este hecho puede evitar confusiones con factores 2 en el cálculo anterior y en otros posteriores.

que empezar a producir chasquidos rápidamente, indicando un alto nivel de radiactividad de la muestra. En realidad, un contador Geiger situado dentro o cerca de un litro de agua no registra un alto nivel de actividad y sólo produce alrededor de un chasquido por segundo.

Incluso este nivel de actividad se debe a los rayos cósmicos, pero vamos a ignorar esto en aras del razonamiento. Supongamos que proseguimos y damos por sentado que estamos midiendo una desintegración de un protón por segundo en nuestra muestra. ¿Qué valor del tiempo de vida del protón nos daría eso? Una desintegración por segundo corresponde a unas 3×10^7 desintegraciones por año. En una muestra de 6×10^{26} partículas, esto corresponde a un tiempo de vida de $6\times10^{26} / 3\times10^7 = 2\times10^{19}$ años. Esto es ya un factor 500 mayor que el límite obtenido al usar el cuerpo humano como detector.

Pero ni siquiera este límite es lo bastante preciso, ya que, como insinuamos, casi todas las cuentas que atribuimos a la desintegración de protones se debían, en realidad, a la influencia de los rayos cósmicos. En la práctica, descubriríamos este hecho con sólo observar que nuestro contador Geiger seguía marcando una cuenta por segundo aproximadamente tanto si estaba en la muestra de agua como si no. Esto nos llevaría a sospechar que los chasquidos no eran en realidad el registro de desintegraciones y podríamos verificar esta hipótesis con sólo situar el contador bajo una pila de ladrillos de plomo, para protegerlo de los rayos cósmicos. El número de cuentas disminuiría radicalmente, tanto con el contador dentro del agua como fuera de ella. Llegamos así a la conclusión de que, si queremos realizar un intento serio para detectar la radiactividad asociada con la desintegración del protón, es mejor que encontremos alguna manera de alejar los rayos cósmicos del área experimental. El único modo de hacerlo es disponer por encima del aparato la cantidad suficiente de materia para que ésta absorba los rayos cósmicos (y las partículas producidas en sus colisiones) y los mantenga alejados de los instrumentos. Dado el poder de penetración de los rayos cósmicos, la única forma práctica de obtener una pro-

tección adecuada es situar todo el experimento dentro de una mina.

De hecho, el mejor límite en el tiempo de vida del protón antes del actual interés sobre el tema se obtuvo como resultado secundario de un experimento diseñado para registrar interacciones entre rayos cósmicos y neutrinos a gran profundidad bajo el suelo. Este experimento lo realizaron grupos de la Case Western Reserve University, de la University of California en Irvine y de la University of Witwatersrand, y el conjunto de instrumentos consistía en 20 toneladas de material instalado en una mina de oro a más de 3 kilómetros de profundidad en Sudáfrica. Después de analizar sus resultados de un modo similar en esencia (pero mucho más complicado) a nuestro análisis de litro de agua, los experimentadores llegaron a la conclusión de que el tiempo de vida del protón tenía que ser mayor que 10^{30} años. Digo “mayor que” porque no observaron ningún hecho que pudiera asignarse a la desintegración de un protón, y la sensibilidad de sus instrumentos era tal que hubieran observado estos hechos si la vida del protón fuera menor que 10^{30} años.

Este tiempo es tan largo que resulta prácticamente inimaginable. Recordemos que la edad del Universo es de “sólo" unos 10^{10} años. Si una persona hubiera estado viva desde el Big Bang, sólo se habrían desintegrado hasta ahora 100 millones de protones de su cuerpo, una masa mucho menor que la de una célula y aproximadamente igual a las de unos cuantos virus o a un centenar de moléculas de proteínas corrientes. En términos de diseño experimental, un tiempo de vida tan largo significa que si queremos observar una desintegración de protón por año tenemos que analizar y vigilar una muestra de 10^{30} protones. Esto es más o menos $1{,}67 \times 10^{3} = 1{,}67$ toneladas de masa, el equivalente de una pequeña piscina llena de agua. Si queremos mejorar esta medición, tenemos que observar un número de protones y, por lo tanto, de materia proporcionalmente mayor.

Ésta era la situación experimental en 1974, cuando Steven Weinberg, Howard Georgi y Helen Quinn (que estaban entonces en la Harvard University) propusieron el esquema de

la gran unificación e hicieron la primera predicción cuantitativa del tiempo de vida del protón. Su predicción era que el protón tenía que desintegrarse con un tiempo de vida de 10^{32} años. Un refinamiento posterior redujo este número a unos 10^{31} años. Sin embargo, el número exacto no es tan importante como la sorprendente coincidencia que suponen estos cálculos. Justo cuando los teóricos elaboraban una teoría capaz de predecir el ritmo de desintegración del protón, los experimentadores terminaban un trabajo que mostraba que los límites hallados para este proceso eran sólo ligeramente más bajos que la predicción.

Esto significa que los experimentadores sabían que si podían diseñar un aparato que fuera sensible a la desintegración del protón a un nivel de 10^{31} o 10^{32} años, podían asegurar la obtención de un resultado interesante. O bien serían capaces de medir un nuevo proceso fundamental o bien demostrarían que los cálculos teóricos eran erróneos. (Como físico teórico que soy, nunca he llegado a saber cuál de estas dos perspectivas es más atractiva para mis colegas experimentadores, aunque de hecho poco importa.) La combinación del desafío tecnológico y las predicciones teóricas resultó ser irresistible y se produjo la carrera para detectar la desintegración del protón. Antes de considerar algunos de los esquemas ingeniosos que se han propuesto para llevar a cabo esta tarea, convendría hacer una pequeña disgresión y discutir exactamente de qué manera la GUT predice la desintegración del protón.

MARCO TEÓRICO

El modelo del protón en la GUT es, en realidad, muy sencillo. Hay tres quarks ligados por una interacción en la que interviene el intercambio de gluones. En términos del tipo de diagramas que hemos utilizado para discutir las fuerzas fundamentales, el protón tendría el aspecto de la figura 31. Dos quarks u y un quark d se mueven juntos e intercambian un gluón de vez en cuando. Mientras el protón sea estable, esto es todo lo que hay.

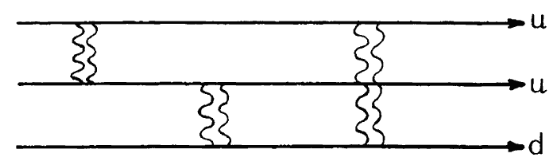


Fig. 31

En el capítulo 7 vimos, sin embargo, que hay otros tipos de partículas que pueden intercambiarse entre los quarks. El bosón X es una de ellas. A partir de las propiedades del X, sabemos que un proceso como el que se representa en la figura 32 es teóricamente posible: uno de los quarks *u* emite un X de carga 4/3 y, en el proceso, se convierte en un quark anti *u* (carga –2/3). Este proceso, por supuesto, viola la conservación de los bariones, pero es compatible con la conservación de la carga eléctrica y la energía. El quark anti *u* se combina con el otro quark u para formar un mesón neutro corriente, mientras que el X interacciona con el quark *d* y produce un positrón. De nuevo se viola la conservación de los bariones en esta interacción, pero nada más. El resultado neto de esta interacción es que el protón original se convierte en un mesón neutro (como el π°) y un positrón.

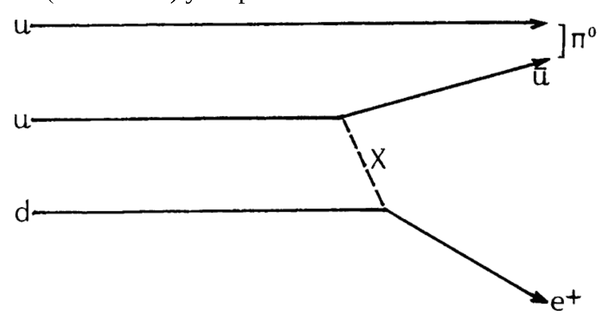


Fig. 32

Otra alternativa es la de la figura 33, que correspondería a la desintegración del protón en un mesón π cargado positivamente y un antineutrino. En este caso se intercambia el X con carga +1/3.

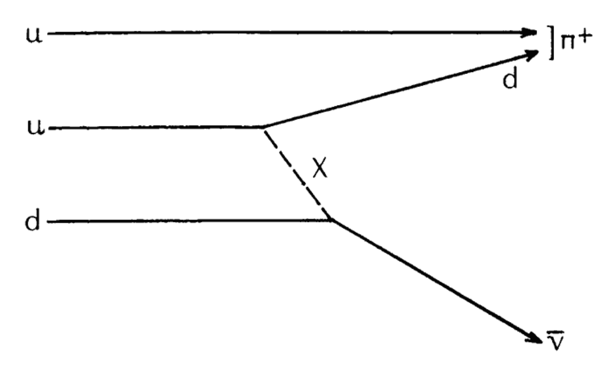


Fig.33

La razón por la cual el protón sería casi estable queda clara a partir de estos diagramas. Cualquier proceso que lleve a la desintegración de un protón supone necesariamente el intercambio de una partícula X, y la partícula X tiene una masa característica de la gran unificación, 10^{15} G*e*V. Igual que la debilidad de la interacción débil se atribuye directamente a la gran masa de los bosones vectoriales, también la extrema lentitud de la desintegración del protón es atribuible a la gran masa de la partícula X.

Estos diagramas (y otros parecidos) sugieren también cómo aparecería una desintegración de un protón en el laboratorio (véase la fig. 34). Un protón en una muestra aislada se desintegrará y producirá, por ejemplo, un π^0 y un positrón. Los detectores usuales detectarán a este último, mientras que el primero recorrerá una corta distancia antes de desintegrarse en dos fotones, que también pueden ser detectados con instrumentos adecuados. Por lo tanto, en este caso, reconoceríamos la desintegración del protón al observar un grupo de partículas con una carga neta +1 que aparecen en nuestro apartado sin que nada haya entrado desde el exterior.

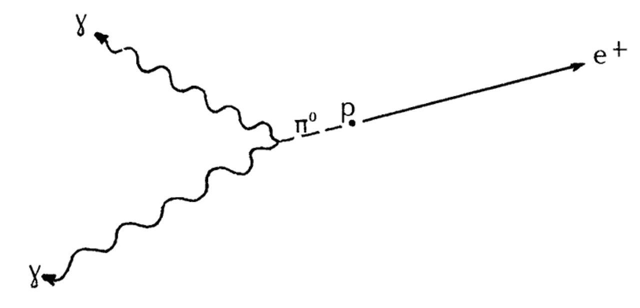


Fig. 34

Este último punto es muy importante. Si una partícula sin carga (un neutrino, p. ej., o un neutrón producido por una colisión de un rayo cósmico cerca del experimento) entrara en el aparato, podríamos tener una situación como la de la figura 35. El neutrino entrante, al no tener carga, no sería observado, aunque hemos indicado su presencia mediante una línea de trazos. Cuando el neutrino choca con un protón, produce un positrón y una resonancia, que se desintegra rápidamente en un π^o y un neutrón. Parte del tiempo el neutrón se moverá con lentitud, por lo que, a menos que se tenga cuidado en el diseño del aparato, pasará desapercibido. Si sucede así, el experimentador observará exactamente lo mismo que en una desintegración genuina de un protón. Esto ilustra la complejidad del problema.

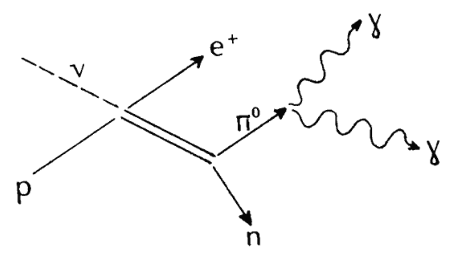


Fig. 35

REVISIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

En la tabla siguiente, indicamos la cantidad de materia que se debe controlar para observar una desintegración de un protón por año. En cada caso, damos también la longitud del lado del cubo de agua que se necesitaría para contener todos los protones. La tabla muestra que en seguida podemos vemos implicados en cantidades prodigiosas de materia en el juego de la desintegración del protón. Por ejemplo, la cantidad de agua necesaria para observar una desintegración por año para un tiempo de vida de 10^{32} años es equivalente al volumen de una casa pequeña. Los números de la tabla nos dan una idea cabal de la escala de los experimentos que se están desarrollando en la actualidad.

Hay dos esquemas generales para detectar la desintegración del protón, que se diferencian por el tipo de material escogido. Una clase, los llamados detectores densos, usan algún material pesado, como hierro u hormigón, como fuente de protones. Este procedimiento tiene la ventaja de ser más compacto; un detector de 30 toneladas puede caber en una habitación pequeña. Además, es más fácil conseguir que los productos de desintegración se detengan dentro del volumen del detector, una propiedad técnica importante. Por otra parte, la densidad del material obliga a que los instrumentos para detectar los productos de desintegración tengan que situarse con muy poca separación entre sí por todo el aparato. Los detectores de agua requieren un volumen mayor para contener el mismo número de protones. Sin embargo, el agua muy pura es notablemente transparente. Por consiguiente, este tipo de detectores pueden utilizar un fenómeno llamado radiación Cerenkov para detectar partículas a gran distancia y no requieren la densidad de instrumentos característica de los detectores densos.

Tiempo de vida supuesto (años)	Masa del material (toneladas)	Lado del cubo de agua (metros)
10^{30}	1,67	1.19
10^{31}	16,7	2,56
10^{32}	167,0	5,51

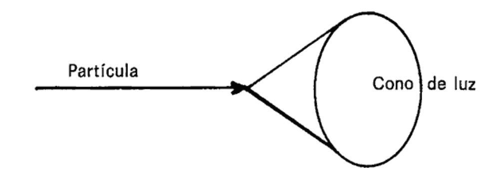


Fig.36

Cuando una partícula cargada se mueve a través de un medio a una velocidad superior a la de la luz en el medio (pero no la velocidad de la luz en el vacío), produce una emisión de luz que adopta la forma de un cono, tal como se muestra en la figura 36. Esta emisión es análoga a la explosión sónica emitida por un avión que se desplaza a mayor velocidad que la del sonido. La luz emitida de esta forma se llama radiación Cerenkov, en honor al físico ruso Pavel Cerenkov, que fue galardonado con el premio Nobel por su descubrimiento en 1958 (de hecho, el descubrimiento fue realizado en los años 30). Si la desintegración de un protón en un tanque de agua produce la emisión de partículas rápidas, entonces cada una de estas partículas emitirá radiaciones Cerenkov. Si el agua es suficientemente pura, los detectores podrán registrar esta radiación a gran distancia. Por lo tanto, la ventaja del detector de agua es que no se requiere que los instrumentos para registrar las desintegraciones estén apiñados densamente en el agua, sino que pueden estar dispersos. En algunas versiones del experimento, los detectores pueden disponerse a lo largo de las paredes del tanque de agua y dejar la masa central libre de obstáculos.

En las figuras 37 y 38 se muestran unos esbozos muy simplificados del aspecto de estos dos grandes tipos de detectores en operación. La figura 37 corresponde a un detector denso. Está constituido por placas de hormigón que contienen detectores de partículas. Estos detectores son largos tubos de gas, de aspecto parecido a tubos fluorescentes. Cuando una partícula pasa a través del tubo, se genera una señal eléctrica. Los tubos están dispuestos de manera que cada capa forma un ángulo recto con la situada encima. Una partícula que se mueva a través de las capas excitará los tubos sucesivamente,

con lo cual dejará a su paso un registro de su movimiento. La alternancia de las direcciones de los tubos permite seguir su trayectoria. Por ejemplo, si se disparara en primer lugar el tubo marcado 1, seguido del tubo marcado 2, sabríamos que la partícula había estado en el área definida por la intersección de ambos tubos; el punto marcado A.

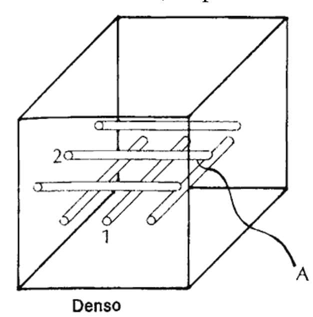


Fig. 37

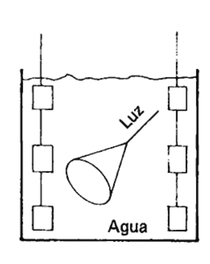


Fig. 38

El detector de agua opera de una manera algo diferente, como se muestra en la figura 38. En este caso, una partícula en movimiento a través del aparato emite un cono de luz que es detectado por varios fototubos. A partir de la posición de estos fototubos y del ángulo con que la luz incide en ellos, se puede deducir la posición de la partícula.

A primera vista, parece fácil poner en marcha un experimento de desintegración del protón, por lo menos en principio. Sólo hay que encontrar un lugar subterráneo adecuado, reunir la cantidad apropiada de protones, instrumentar el sistema y esperar que suceda algo. Sin embargo, como era de esperar, la realidad de la situación es muchísimo más complicada que la teoría. Ya hemos visto que la posibilidad de que partículas sin carga puedan entrar en el detector introduce el problema, bastante difícil, de separar sucesos que se parecen a desintegraciones de protones pero que no lo son. Este problema es especialmente agudo cerca de los bordes del detector, puesto que tanto las colisiones de rayos cósmicos como las desintegraciones radiactivas normales del material cercano pueden generar partículas capaces de producir señales simila-

res a las que se detectan en la desintegración de un protón. Esto significa que cualquier suceso cerca de los bordes de la masa que se está controlando tiene que ser descartado, y sólo se consideran fiables aquellos sucesos en los que los rastros de las partículas están por completo dentro de la masa central (el llamado volumen fiducial) del detector.

En el caso de los detectores de agua, esto significa que deben descartarse los sucesos a menos de unos 1.8 m de las paredes del tanque de agua. Según nuestra tabla, vemos que el volumen mayor de agua que aparece en ella, un cubo de 5,5 m de lado, tendría un volumen fiducial equivalente a un cubo de sólo 1,8 m de lado, o de sólo 4×10^{30} protones. Por lo tanto, el “efecto de borde" obliga a que, en un experimento real, el volumen de materia sea mucho mayor que los que se indican en la tabla. Por ejemplo, el mayor detector de agua que existe contiene unas 10.000 toneladas de agua, que corresponde a un tanque tan grande como un edificio de cinco plantas. Esto supone más de 10^{33} protones en el volumen fiducial, suficientes para producir 100 desintegraciones por año (unas 2 por semana) si el tiempo de vida es de 10^{31} años.

En el caso de los detectores densos, es posible un planteamiento alternativo al problema del borde. El detector, a causa de su tamaño relativamente pequeño, puede rodearse de contadores que registren el paso de partículas descarriadas. De esta manera, pueden identificarse los sucesos creados por estas partículas y rechazarse (o *vetarse*, si utilizamos la jerga de los físicos experimentales).

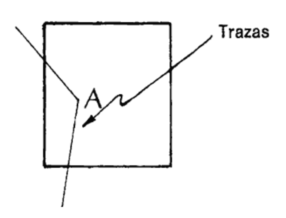


Fig. 39

Este efecto de borde explica por qué, la primera vez que se pretendió haber detectado la desintegración de un protón, el hecho fue acogido por la comunidad científica con mucho

escepticismo o incluso simplemente con incredulidad. El experimento era una colaboración entre físicos indios y japoneses, que utilizaban un detector denso formado por 150 toneladas de hierro situadas a 3.600 m bajo tierra en el Rolar Gold Field, en la India. Estos científicos observaron algunos sucesos del tipo de la figura 39: dos o más rastros que emanan de un punto, con uno de los rastros, como mínimo, que tocaba el borde del detector. Hay dos interpretaciones posibles de este tipo de suceso: una es que se produjo una desintegración genuina de un protón en el punto A; la otra es que una partícula entró en el aparato desde la izquierda, colisionó con un núcleo en el punto A y experimentó una desviación o bien produjo, en el proceso, otra partícula cargada. Si hubiera habido un contador al lado, habría sido posible descartar una de las dos alternativas y habría hecho factible una interpretación sin ambigüedades del suceso. De momento, los sucesos de este tipo no proporcionan una evidencia sólida de la desintegración del protón.

En el fondo de la mina

La necesidad de proteger de los rayos cósmicos cualquier experimento de desintegración del protón significa que éste debe llevarse a cabo en una mina o en un túnel profundo, en algún lugar bajo unos cientos de metros de roca, pero lo bastante accesible para que se pueda instalar el equipo y mantenerse en funcionamiento durante un período de varios años. Decir a un experimentador que “encuentre una mina" es una reminiscencia de una vieja receta de Kentucky para el estofado de oso, que empieza así: «Primero, consiga un oso.» Es más fácil decirlo que hacerlo. En Europa hay algunos túneles en los Alpes (especialmente los que están bajo el Mont Blanc) que se encuentran bajo una cantidad de roca suficiente para quedar al abrigo de los rayos cósmicos, y los físicos europeos tienen la suerte de poder instalarse en las viejas cavernas que fueron abiertas como depósitos de equipo en estos túneles. Sin embargo, en Norteamérica no tenemos tanta suerte. Cuando surgió el interés por los experimentos de desintegración del protón, a finales de los años 70, se desencadenó una

furiosa lucha a escala nacional para encontrar sitios donde trabajar, proceso que implicaba necesariamente la búsqueda de espacio en una mina profunda.

En América, hay una industria minera floreciente, por supuesto, pero gran parte de ella está dedicada a minerales superficiales, que pueden explotarse mediante pozos superficiales o zanjas. Es evidente que estas minas a cielo abierto no son adecuadas para el experimento de desintegración del protón. Las minas de carbón, aunque son muy comunes, presentan un problema diferente debido al peligro siempre presente de explosión, que impide el uso del tipo de equipo electrónico que los experimentadores tendrían que instalar. Esto deja dos posibilidades: las minas de sal, que suelen tener grandes cavernas excavadas durante el proceso de explotación, y las minas de metales, cuyo valor justifica el alto coste de excavar profundamente en la tierra. Ambos tipos se usan en la actualidad para albergar experimentos de desintegración del protón.

La sal es uno de los materiales más baratos que se pueden comprar; en el supermercado un kilo vale unos 50 centavos. Esto significa que la sal tiene que ser extraída bastante cerca del lugar donde se la tiene que procesar y utilizar ya que de otra forma los gastos de transporte elevarían demasiado su coste y dejaría de tener mercado. Hay una mina, operada por Morton Salt, una división de la Morton-Thiokol Company, situada cerca de la orilla del lago Erie en Ohio. La mina se extiende, en realidad, por debajo del lago. Cuando los físicos de la University of Michigan, de la University of California en Irwine y de los Brookhaven National Laboratories empezaron a investigar este emplazamiento como sitio posible para construir el mayor detector de agua del mundo, pareció que era ideal en muchos aspectos: cercano a grandes centros de comunicaciones, 600 metros bajo tierra y operado por una empresa dispuesta a colaborar en el proyecto. Desgraciadamente, no había ninguna cámara en la mina lo suficiente grande para albergar el detector.

Entonces, en una de esas casualidades que suceden de vez en cuando para que sigamos creyendo en los finales felices, la

Dosco Company, compañía dedicada a la fabricación de equipo pesado de minería, apareció en escena con una nueva máquina con la que querían hacer una demostración a Morton. Se puso a trabajar la máquina y excavó con diligencia una cavidad que podía contener un edificio de cinco plantas. Como producto secundario, los físicos obtuvieron sal por valor de 60.000 dólares, que revendieron a Morton. Empezaron entonces a trabajar en la instalación de un inmenso recipiente plástico para contener el agua. En agosto de 1982, tras solucionar algunos problemas debidos a filtraciones, el recipiente se llenó con 10.000 toneladas de agua purificada, se pusieron en marcha los 2.048 detectores Cerenkov y empezó la larga espera de la señal de la desintegración del protón.

El detector de Minnesota

Los problemas que tuvo que afrontar Marvin Marshak, jefe de un experimentó de desintegración del protón centrado en la University of Minnesota, fueron algo distintos. El grupo de Minnesota fue el primero en montar y poner en funcionamiento un experimento de desintegración del protón en Norteamérica. Al principio, habían estado implicados en la búsqueda de una mina cuando formaban parte de un grupo mayor. La historia de las negociaciones que tuvieron lugar a finales de 1978 y durante 1979 nos da una idea del modo en que funcionan hoy los grandes proyectos de física. Los equipos de las diversas universidades que participaban en la concepción y el diseño del experimento volaban a Chicago, se reunían durante el día y regresaban a casa en los vuelos nocturnos, como si fueran un grupo de ejecutivos de ventas. Al progresar las negociaciones, había abogados y contratos suficientes para satisfacer al más cauto asesor legal. Tengo que admitir que estaba un poco sorprendido de que los físicos de la "torre de marfil" funcionaran de esta forma, pero recordé entonces que los grandes experimentos de desintegración del protón tales como el de debajo del lago Erie costaban más de tres millones de dólares entre construirlos y operarlos, dinero más que suficiente para justificar todas las negociaciones previas. (Temo que la imagen de científico solitario trabajan-

do en su laboratorio es una cosa del pasado, por lo menos en los experimentos en gran escala de la física de las partículas.)

En cualquier caso, el grupo empezó a buscar mientras tanto un espacio adecuado en una mina. Tal como Marshak lo explica: «Nos enfrentábamos con un verdadero dilema. Cuando una mina queda abandonada, se deteriora rápidamente y el coste de renovar y mantener una mina abandonada estaba por completo fuera de nuestro alcance. En las minas en activo, por otra parte, con frecuencia se paga a los mineros según un sistema de incentivos, por lo que tener a un grupo de físicos interfiriendo en su trabajo les hubiera costado dinero. No es una situación en la que nos hubiera gustado encontramos.»

Su búsqueda les llevó a oficinas federales y estatales de inspectores de minas, a profesores de minería y a cualquiera que pudiera conocer un sitio adecuado para su experimento. En todos los sitios preguntaban: «¿Conocen ustedes una mina que pudiéramos utilizar?» y la respuesta era siempre no. Entonces, en 1978, más o menos cuando el grupo de Minnesota empezó por su cuenta, Marshak recordó un lugar que había visto en el norte de Minnesota, cerca de la ciudad de Soudan, unos trescientos kilómetros al norte de Minneapolis. Había allí un parque estatal para conmemorar una de las primeras minas de hierro de Minnesota, mina que había terminado sus operaciones comerciales en 1963. El estado de Minnesota se encargaba de su mantenimiento y durante el verano la visitaban grupos de turistas. En otras palabras, era una mina que estaba en mantenimiento pero no en producción, la combinación perfecta para el experimento que Marshak tenía en mente. La universidad obtuvo rápidamente el permiso para utilizar a este objeto una de las cámaras de la mina, situada un poco por debajo de los seiscientos metros bajo el suelo.

Mientras se desarrollaba la búsqueda, el grupo de Minnesota había decidido que, para alcanzar su propósito, era más idóneo utilizar un sistema detector denso en lugar de agua, por lo que empezó a trabajar en un pequeño prototipo (30 toneladas) del detector. Convencieron a una compañía local para que donara un par de camiones de mineral de hierro. Los científicos llevaron el mineral a la universidad, compraron

una hormigonera en Sears Roebuck, contrataron unos cuantos estudiantes y empezaron a trabajar en un viejo edificio cerca del río Mississippi. Mezclaron el mineral con hormigón y fabricaron 432 losas, cada una de 3 m por 30 cm por 4 cm (el tamaño de la losa venía dictado por lo que dos estudiantes podían manejar sin problemas). Cada losa tenía en su interior ocho tubos de acero del tamaño aproximado de la manguera de un aspirador. Estos tubos iban a contener los contadores necesarios para detectar los productos de la desintegración del protón. El aparato completo se transportó a Soudan y se bajó a la mina, donde se montó y probó. En otoño de 1981 el detector empezó a tomar datos.

PERSPECTIVAS

En enero de 1983, el experimento de Irvine-Michigan-Brookhaven, situado en las minas de sal bajo el lago Erie, anunció sus primeros resultados. En ochenta días, no se había visto en el aparato ningún suceso candidato a ser la desintegración de un protón. A partir de este hecho, llegaron a la conclusión de que el tiempo de vida del protón tiene que ser más largo de 6×10^{31} años. Resultados más recientes, basados en un tiempo de observación mayor, han puesto este límite cerca de 10^{32} años, sin haber visto ninguna desintegración. Lawrence Sulak, de la University of Michigan, comentaba que, en base a estos resultados, su grupo tardaría unos tres años en poner este límite en 6×10^{32} años. Si no se observaban desintegraciones durante este período, parecía poco probable que se pudiera detectar la desintegración del protón en un futuro cercano. La razón es que a este nivel (que corresponde a un suceso por mes en el detector del lago Erie) los cálculos teóricos indican que empezarán a aparecer sucesos iniciados por neutrinos incidentes, indistinguibles de las desintegraciones de protones. Los contadores de veto no distinguen los neutrinos, por lo que estos sucesos no se pueden separar de las desintegraciones genuinas de protones. El límite del tiem-

po de vida del protón que se puede detectar con este tipo de detectores es, por consiguiente, de 6×10^{32} años.



El detector de la desintegración del protón de Marvin Marshak es un rectángulo de treinta toneladas de losas de hormigón de taconita y 3.456 tubos, cada uno de ellos con un amplificador formado por cinco circuitos integrados. El amplificador amplía cualquier señal de la desintegración del protón. Toda la unidad está asociada a un computador conectado a un teléfono, de manera que los resultados se pueden controlar desde el exterior de la mina en la que está situado el detector, bajo seiscientos metros de roca sólida, en el norte de Minnesota *Foto de Tom Foley, cortesía del University of Minnesota News Service.*

Mientras tanto, los teóricos han afinado la predicción teórica basada en el modelo más sencillo de la GUT, explicado en el capítulo 7. La predicción teórica actual es que el tiempo de vida tiene que estar entre $10^{27,3}$ y $10^{30,7}$ años. El hecho de que la predicción tenga una amplitud tan grande se debe a las incertidumbres relacionadas con varias dificultades técnicas en el desarrollo de los cálculos. Sin embargo, la predicción está en relativo desacuerdo con los resultados experimentales citados antes. Los teóricos se apresuran a señalar, sin embargo, que esta predicción es el resultado de la versión más sencilla de la GUT y que hay otras versiones, más complejas, que predicen valores distintos para el tiempo de vida del protón.



Vista general de la instalación del experimento de desintegración del protón de Marshak. *Foto de Tom Foley, cortesía del University of Minnesota News Service.*

SUMARIO

La GUT predice que los protones y neutrones ordinarios, que hasta ahora se creía que eran absolutamente estables, pueden desintegrarse. No observamos de ordinario estos procesos porque se supone que el tiempo de vida del protón es muy largo, 10^{31} años o más. Cuando el protón se desintegra, se transforma en un positrón y un mesón, y el mesón se desintegra a su vez en un par de fotones. Por lo tanto, el producto final de la desintegración es la desaparición completa del protón.

Dado que ninguna otra teoría ha hecho una predicción como ésta, la detección de la desintegración del protón se ha convertido en uno de los grandes objetivos de los físicos experimentales. En el momento de escribir esto, no se ha observado esta desintegración, a pesar de que se han hecho esfuerzos experimentales muy importantes para tratar de

conseguirlo. Esto significa que el tiempo de vida del protón es algo más largo de lo predicho por la teoría, aunque es relativamente sencillo modificar la GUT para acomodarse a los resultados experimentales.

TERCERA PARTE

Con una comprensión de la teoría de la gran unificación, tenemos la capacidad de predecir el comportamiento de la materia a energías muy altas. Nos vimos obligados a dejar nuestra discusión sobre el Big Bang cuando estábamos aún a un milisegundo del momento de la creación, ya que en aquel punto se agotó nuestra capacidad para describir las interacciones de las partículas entre sí. Sin las teorías de la gran unificación, sería imposible dar el paso siguiente en el tiempo. En la tercera parte, gracias a nuestro nuevo conocimiento, avanzamos por este territorio antes inexplorado. Nuestro guía será la teoría, ya que las temperaturas serán tan elevadas que no hay posibilidad de que se puedan reproducir en nuestros laboratorios en un futuro razonable. Nuestro viaje nos llevará tentadoramente cerca de nuestro objetivo de alcanzar el momento de la creación.

IX. EL MOMENTO DE LA CREACIÓN

Helaba hasta la misma China.
Helaba arriba hasta la Luna.
A mil grados bajo cero,
se heló mi amado trapero.
«El trapero helado»

BALADA POPULAR DE NUEVA INGLATERRA

CONGELACIONES MÚLTIPLES

El factor más importante de la historia del Universo es que éste se enfría a medida que se expande. Puesto que la materia se comporta de forma muy distinta a temperaturas diferentes, no es sorprendente que el Universo haya presentado aspectos diferentes en distintos momentos del pasado. La mejor analogía es una nube de vapor cuando su temperatura baja: primero veremos un gas, luego el gas se condensará en gotas de líquido y, por último, si la temperatura ambiente es suficientemente baja, veremos que el líquido se convierte en hielo sólido. Este último cambio, de líquido a sólido, recibe el nombre de congelación. Sin embargo, para nuestra descripción del Universo primitivo, usaremos esta palabra con un sentido ligeramente diferente. Siempre que la materia de un sistema se reordene en respuesta a una disminución de la temperatura, decimos que el sistema ha experimentado una congelación en el sentido que hemos dado a esta palabra desde el capítulo 2. Así, tanto la condensación del vapor en agua como la transformación del agua en hielo constituyen una congelación.

En el capítulo 2 discutimos dos de estas congelaciones en la historia del Universo. Eran la formación de núcleos a partir de partículas elementales 3 minutos después del Big Bang y la formación de átomos a partir de electrones libres y núcleos unos 500.000 años más tarde. En la primera etapa, la tempera-

tura del Universo antes de la congelación era tan alta que cualquier núcleo que llegara a formarse habría sido destruido en las colisiones. Después de los 3 minutos, la temperatura del Universo era más baja, de modo que la energía de las colisiones era menor que la requerida para romper un núcleo después de su formación. Por lo tanto, la congelación de las partículas en núcleos no pudo ocurrir hasta que la fuerza disruptiva debida a las colisiones fue lo bastante pequeña para ser sobrepasada por las interacciones fuertes atractivas. Se podría decir algo muy parecido de la formación de átomos a partir de núcleos y de electrones, excepto que en este caso la ligazón se debía a la interacción electromagnética en lugar de la fuerte. Cada congelación dio lugar a una nueva era de la historia del Universo, en la que la forma predominante de materia era diferente de la que había sido antes.

Hay otro aspecto de la congelación además del reordenamiento de la materia. Cuando el agua se congela en hielo, su simetría subyacente cambia. En el agua líquida vemos lo mismo —moléculas de agua que se mueven al azar— cualquiera que sea la dirección en que miremos. Por el contrario, en el hielo hay determinadas direcciones del espacio que son distintas de las otras, hecho que se pone de manifiesto cuando se observa un copo de nieve. Ambos efectos —reordenación de la materia y cambio de la simetría— van juntos. En una congelación ordinaria, como la del agua en hielo, existe también una diferencia de energía entre el conjunto de moléculas libres de agua a 0°C y la estructura cristalina del hielo a la misma temperatura. Esta diferencia de energía debe extraerse del sistema para que el agua se congele y debe añadirse al sistema para fundir el hielo. Por esta razón un refrigerador necesita energía eléctrica para hacer cubitos de hielo y estos cubitos de hielo absorben calor de una bebida. Las congelaciones en las que ocurre tal diferencia de energía los físicos las denominan transiciones de fase de la primera especie. En la naturaleza hay algunas transiciones —la más común de las cuales es la que interviene en la formación de un imán corriente— en las que la reordenación de la materia y el cambio de simetría asociado con la congelación no van acompañados

de una liberación de energía. Son las que se denominan transiciones de fase de la segunda especie. En general, las congelaciones que suponen la aparición de nuevas formas de materia (como átomos y núcleos) son transiciones de primera especie, mientras que en las que intervienen fuerzas son de segunda especie.

Podemos generalizar el concepto de congelación para incluir los procesos de unificación si tenemos en cuenta que, cuando dos fuerzas se unifican, cambia la simetría fundamental de la naturaleza. Esto es análogo al cambio de simetría del agua cuando se congela en hielo, aunque las congelaciones de fuerzas no suponen una reordenación fundamental de la materia como la que ocurre en la formación de átomos, núcleos o cristales de hielo. Cuando hablemos de la congelación de una fuerza, nos referiremos, por lo tanto, al proceso por el que se pierde la unificación de las dos fuerzas cuando la temperatura disminuye por debajo del punto en que la energía de colisión es menor que la necesaria para la unificación.

La temperatura a la que se congela una fuerza depende de la masa de las partículas que se intercambian para generarla. Esto, a su vez, depende del fenómeno de rotura espontánea de la simetría discutida en los capítulos 6 y 7. Cuando la energía de las colisiones es mucho mayor que la energía de la masa de las partículas pesadas que intervienen en la unificación, se pondrá de manifiesto entonces la verdadera simetría de la fuerza. Por ejemplo, la simetría subyacente de la interacción electrodébil requiere que el fotón (con masa nula) y los bosones vectoriales (con masas cercanas a los 100 G*e*V) se comporten como miembros de la misma familia de partículas sin masa. Esto requiere una temperatura muy alta. En el centro de las estrellas, las temperaturas de nuestra era proporcionan energías de colisión menores del 10% de 1 G*e*V. Incluso 1 milisegundo después del Big Bang las temperaturas estaban por debajo de 1 G*e*V. Por tanto, en ningún momento del período de la historia que hemos explorado hasta ahora la temperatura ha sido lo suficiente alta para proporcionar energías comparables a la masa de unificación de 100 G*e*V de la interacción electrodébil. Para encontrar tales temperaturas, debe-

mos buscar en el primer milisegundo. Esto también es válido, por supuesto, para la masa mucho mayor implicada en la unificación de la fuerza fuerte con la electrodébil (10^{15} G*e*V).

Si empezamos en el Big Bang y nos movemos hacia delante en el tiempo, esperamos ver una serie de congelaciones. Algunas de ellas supondrán la aparición de nuevos tipos de materia, mientras que en otras intervendrán fuerzas. Fuerzas que son idénticas entre sí a temperaturas muy altas experimentarán una rotura espontánea de simetría al bajar la temperatura y se diferenciarán. Cada congelación, sea de materia o de fuerza, inaugurará una nueva era de la historia del Universo. Esto significa que esperamos que el primer milisegundo muestre la misma distribución general de períodos de quietud con períodos puntuales de rápido cambio, que ya hemos visto que ocurrían durante los 15.000 millones de años siguientes.

La congelación de los quarks (10^{-4} segundos)

Como cabía esperar, la era de las partículas surgió a partir de una congelación. Entre los 10^{-6} y los 10^{-3} segundos (es decir, entre 1 microsegundo y 1 milisegundo después del Big Bang), las partículas elementales se condensaron a partir de un mar de quarks calientes. El momento exacto de esta congelación es objeto de cierto debate teórico en la actualidad, pero la mayoría de teóricos lo sitúan entre los 10^{-4} y 10^{-5} segundos. En cualquier caso, es claro que cuando el Universo tenía 1 milisegundo de edad, casi todos los quarks habían sido incorporados en una partícula elemental familiar. Algunos quarks se habrían combinado con antiquarks para formar mesones, mientras que otros lo habrían hecho con otros dos quarks con carga de color apropiado para formar bariones. A partir de la discusión del confinamiento de los quarks en el capítulo 7, sabemos que una vez los quarks se han incorporado en partículas, jamás pueden volver a escapar. Los cálculos teóricos parecen indicar que a temperaturas muy altas los quarks no están confinados de esta forma, pero, al bajar la temperatura, las fuerzas responsables del confinamiento prevalecen y los quarks se condensan en partículas. Esta condensación puede considerarse como una congelación de los quarks. Los deta-

lles de cómo (y a qué temperatura) sucede esto es objeto de debate entre los teóricos, pero no hay duda de que existe una cierta temperatura crítica por encima de la cual los quarks no están confinados en partículas y por debajo de la cual sí lo estarán. Cabe suponer así que los quarks libres habrían desaparecido del Universo antes de transcurrir 1 milisegundo después del Big Bang.

No obstante, en cualquier proceso tan caótico como las primeras etapas del Big Bang podemos esperar que ocurran algunos sucesos anómalos. Puede haber unos cuantos quarks que, por alguna razón, no lleguen a encontrar los compañeros apropiados con quien combinarse. Tales quarks permanecerían como partículas libres y recorrerían el Universo como otros tantos holandeses errantes en busca de compañeros. Los físicos llaman a estas partículas quarks fósiles. La búsqueda de partículas fósiles se discutirá en el capítulo 12.

La era que precedió inmediatamente a la congelación de los quarks la llamaremos era de los quarks. Se caracteriza por la presencia de quarks libres, además de leptones y fotones. En esta era no hay ningún cambio importante en las fuerzas fundamentales. Seguiríamos observando cuatro fuerzas distintas que gobiernan las interacciones de la materia, y no tendríamos ninguna dificultad para identificarlas con fuerzas que observamos hoy en nuestros laboratorios.

La congelación electrodébil (10^{-10} segundos)

La era de los quarks empieza 10^{-10} segundos después del Big Bang, con la congelación de las fuerzas eléctrica y débil. A los 10^{-10} segundos, el Universo se habrá enfriado aproximadamente a unos 10.000 billones de grados. Por encima de esta temperatura, hay suficiente energía en las colisiones entre partículas para crear bosones vectoriales; por debajo de esta temperatura no hay suficiente energía para hacerlo. Otra forma de decirlo es que, antes de los 10^{-10} segundos, la energía de colisión excede los 100 G*e*V, mientras que después de los 10^{-10} segundos no lo hace. En el capítulo 6 vimos que 100 G*e*V es la energía en la que se manifiesta en la naturaleza la unidad subyacente de las interacciones electromagnética y

débil. Por tanto, los 10^{-10} segundos marcan el último momento en que se observó esta unificación y el instante crítico de la transición en que las fuerzas débil y electromagnética se congelaron en su forma actual.

Llamaremos era electrodébil al período que empezó 10^{-35} segundos después del Big Bang y terminó a los 10^{-10} segundos. Esta era se diferencia de la era de los quarks que la sigue en un aspecto. Durante la era electrodébil, las interacciones entre partículas están gobernadas por tres fuerzas fundamentales (en lugar de cuatro): las interacciones fuerte, electrodébil y gravitatoria.

Un espectador que observara el proceso por el cual la fuerza electrodébil se congeló en las fuerzas débil y electromagnética vería cómo el Universo va de un estado de alta simetría a otro de simetría más baja. Observaría también que, mientras que antes de los 10^{-10} segundos se crean muchos bosones vectoriales como partículas libres, esta producción se detiene. Los mesones vectoriales que existían en el instante de la congelación se desintegraron rápidamente, por lo que una vez bien adentrados en la era de los quarks ya no había mesones vectoriales como partículas libres. Seguían desempeñando, por supuesto, el papel de partículas intercambiadas en la interacción débil. Por consiguiente, en lo que se refiere a los mesones vectoriales y a la interacción débil, el Universo ha permanecido en su estado actual desde la edad de 10^{-10} segundos.

La congelación GUT (10^{-35} segundos)

En el modelo convencional del Big Bang, la era electrodébil empieza 10^{-35} segundos después de la creación. La energía disponible en las colisiones en este instante era de unos 10^{15} G*e*V, la energía de la gran unificación discutida en el capítulo 7. La temperatura era de 10^{26} Kelvin, que es casi imposible de imaginar. Esta congelación es con mucho el acontecimiento más interesante de todos los que hemos discutido hasta ahora, por una serie de razones. Desde finales de los años sesenta hemos tenido conocimiento de la unificación electrodébil, pero la idea de que la teoría de la gran unifica-

ción podía aplicarse a la cosmología es mucho más reciente. Por consiguiente, la gente aún está excitada con la idea y es difícil no sentir algo de esta excitación al leer lo que se publica en este campo. Además, nuestro conocimiento de la congelación GUT es aún tan reciente que queda por resolver una gran cantidad de detalles. Nos encontramos en la frontera de lo que se conoce del Big Bang y todas las fronteras del conocimiento son excitantes. Además, esta congelación es de naturaleza más compleja que cualquier otro acontecimiento acaecido durante el primer milisegundo, y mucho de lo que ocurre más tarde viene determinado por lo sucedido a 10^{-35} segundos. No es de extrañarse que haya recibido recientemente tanta atención por parte de los físicos.

En algunos aspectos esta congelación es muy parecida a la de los 10^{-10} segundos. Antes de los 10^{-35} segundos las fuerzas fuerte y electrodébil estaban unificadas, por lo que sólo había dos fuerzas fundamentales que gobernaban el comportamiento de la materia. En esa era, la energía de las colisiones era tan alta que se podían producir copiosamente bosones X. las partículas asociadas a la gran unificación. Después de 10^{-35} segundos, la fuerza fuerte se congeló a partir de las otras dos y nos dejó con las tres fuerzas características de la era electrodébil. Al mismo tiempo, la temperatura del Universo, que se enfriaba rápidamente, había descendido por debajo del punto en que se podían crear partículas X en las colisiones. Estas partículas, sin ningún medio para reabastecer su población, se desintegraron rápidamente y desaparecieron de la escena, para no reaparecer jamás. La comprensión de esta desintegración, tal como veremos más tarde, ha sido útil para resolver el problema de la antimateria que discutimos en el capítulo 3.

Si hemos observado cómo se hiela un lago o un charco en invierno, podremos comprender otro aspecto importante de la congelación de la fuerza fuerte a los 10^{-35} segundos, por lo menos tal como lo describen algunas versiones de la GUT. En un lago, no se forma de golpe una capa de hielo, sino que empieza simultáneamente en varios puntos y se extiende a partir de estos puntos hasta cubrir toda la superficie. En las

teorías que estamos describiendo, la congelación de la fuerza fuerte se produjo de forma muy parecida, y el nuevo nivel de simetría reducida se estableció en primer lugar en pequeños volúmenes del espacio y después se extendió hasta llenarlo todo. Cuando la congelación ocurre de esta forma, cabe esperar que se produzcan irregularidades en el resultado final. Por ejemplo, si se trata de la formación de una capa de hielo, los ejes de simetría de los cristales que crecen alrededor de un centro apuntarán, con toda probabilidad, hacia una dirección distinta de los ejes de simetría asociados con otro centro cercano, tal como se muestra en la figura 40. Cuando el hielo que se extiende a partir de estos dos centros se une, habrá una región donde el eje de simetría cambia de una dirección a otra. El resultado es una disposición como la que se muestra a la derecha de la figura 40, en la que unas regiones con diferentes direcciones de simetría se encajan como piezas de un rompecabezas.

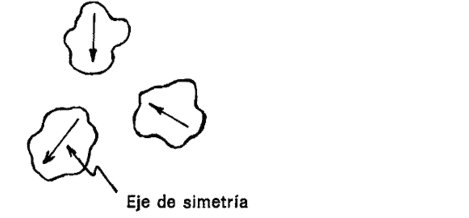


Fig. 40

Cada una de las piezas del rompecabezas recibe el nombre de dominio, y las regiones donde cambia la dirección de simetría se denominan paredes del dominio. Las paredes de dominio son un ejemplo de defecto del cristal, algo que impide que el hielo no sea un único cristal perfecto. Los metalúrgicos han llevado a cabo estudios exhaustivos de las clases de defectos que pueden ocurrir en la naturaleza y resulta que el fenómeno de las paredes de dominio es sólo una de las formas en que un cristal puede ser defectuoso. Otras, como los planos de clivaje de un diamante, son algo más complicados de describir, pero son, sin embargo, comunes.

La congelación GUT puede analizarse de manera parecida a un cristal. Y del mismo modo que un cristal real puede tener defectos, la congelación de la fuerza fuerte puede producir defectos en el Universo. Resulta que hay precisamente tres clases de defectos que se pueden formar en el Universo a los 10^{-35} segundos. Las paredes de dominio —estructuras bidimensionales extensas en el espacio— son una de éstas. Las otras dos, que resultan mucho más interesantes, son defectos de punto y defectos de cuerda.

Los defectos de punto son justo lo que su nombre indica: puntos del espacio donde cambia la simetría. En la figura 41 se muestra un ejemplo de defecto de punto. En una línea cualquiera que pase por el punto, la simetría cambia abruptamente. Una cuerda es una línea unidimensional que separa regiones donde la simetría es diferente. En la figura 42 se muestra un tipo de cuerda.

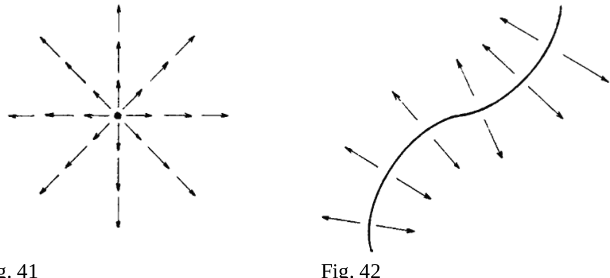


Fig. 41 Fig. 42

Cuando se congela la fuerza fuerte, esperamos, por lo tanto, que el resultado final sea un universo que contenga defectos en forma de cuerdas, puntos y paredes de dominio. La teoría predice que estos defectos serán muy masivos. (Este hecho puede interpretarse como una acumulación de materia alrededor de los defectos durante la congelación.) Los defectos de punto, por ejemplo, se supone que tienen una masa de alrededor de 10^{16} G*e*V. A todos los efectos, estos puntos nos aparecerían como partículas ordinarias pero de masa muy elevada. Lo único poco habitual de ellas es que se supone que llevan una carga magnética aislada. En otras palabras, se comportarían como el polo norte o el polo sur de un imán.

Una partícula así se llama monopolo magnético, y sería otro ejemplo de partícula fósil. Discutiremos su importancia en el capítulo 12.

Los defectos de cuerda tienen también una masa considerable: una longitud de esta cuerda primordial lo suficiente larga para atravesar un átomo pesaría un millón de toneladas. En el capítulo 11 veremos que las cuerdas pueden jugar un papel importante en la resolución del problema de la formación de las galaxias. El tercer tipo de defecto, las paredes de dominio, no han recibido mucha atención hasta la fecha, por lo que poco hay que decir acerca del papel que pueden haber jugado en el desarrollo del Universo, si es que realmente han tenido alguno.

Como se ve, la congelación GUT fue un asunto complicado. No sólo se separaron las fuerzas fundamentales, sino que durante el proceso se formaron nuevos tipos de estructuras a gran escala en el Universo. Por lo menos dos de estas estructuras (puntos y cuerdas), pueden haber desempeñado un papel importante en eras posteriores. Por último, esta congelación marca el punto después del cual ya no se pudieron crear más partículas X en las colisiones, partículas cuyo intercambio provoca la desintegración del protón. Las partículas X presentes en el momento 10^{-35} segundos se desintegraron rápidamente y jamás se han vuelto a observar como partículas libres.

Llamaremos a este período que empieza 10^{-43} segundos y termina 10^{-35} segundos después del Big Bang la era GUT, o era de la teoría de la gran unificación. Es una era con temperaturas muy altas y una energía de las colisiones que varía desde 10^{19} G*e*V al principio hasta 10^{15} G*e*V al final. Es una magnitud difícil de imaginar, pero a modo de comparación diremos que la energía de movimiento de un jugador de fútbol americano que corre a toda velocidad es de unos 10^{14} G*e*V, diez veces menor que la energía asociada con la temperatura más baja de la era GUT. Si imaginamos toda esta energía concentrada en la colisión entre partículas no mucho mayores que un protón, podemos hacemos cierta idea de lo que sucedía en aquel tiempo.

Dado que las partículas X podían producirse copiosamente durante la era GUT, los procesos en que los quarks se convertían en leptones y viceversa eran bastante comunes. (En el capítulo 8, discutimos algunos procesos de este tipo en el contexto del problema de la desintegración del protón.) Esto significa que las partículas, al colisionar unas con las otras, podían cambiar de identidad fácilmente. Cuando se produce esta situación, los físicos dicen que las partículas intercambiables son en realidad idénticas, de la misma manera que diríamos que el hecho de cambiar de un chándal deportivo a un traje de etiqueta no afecta la identidad subyacente de un individuo particular. Por lo tanto, durante la era GUT sólo había dos clases de partículas: fermiones (leptones y quarks, que ahora se consideran idénticos) y bosones (partículas X, gluones, mesones vectoriales y fotones). Con sólo dos fuerzas fundamentales en operación, este universo primitivo era muy simple comparado con el nuestro. De hecho, es una regla general que cuanto más retrocedemos en el tiempo, menos complejo se vuelve el Universo.

El estado de conocimiento actual de la era GUT no es en absoluto completo. Aunque existe un acuerdo general sobre las características principales que hemos discutido hasta ahora, hay algunos puntos que en la actualidad están siendo debatidos por los teóricos. Algunos de estos puntos son de naturaleza técnica; otros son más fundamentales. Entre los puntos técnicos, está la cuestión de qué tipo de simetría tenía exactamente el Universo durante esta fase. En el capítulo 6 vimos que las simetrías juegan un papel importante en la determinación del comportamiento de las fuerzas fundamentales y que el lenguaje matemático apropiado para describir las simetrías es la teoría de los grupos. La jerga de la teoría de los grupos puede calificarse, como mínimo, de esotérica, pero cuando los físicos discuten si la simetría apropiada durante la era GUT es la $SU(5)$, la $SO(10)$, la E_7 o cualquier otra, en realidad, debaten qué tipo de simetría describe de hecho las interacciones subyacentes.

Un problema más fundamental es el que atañe al ritmo de expansión del Universo durante este período. En el modelo

convencional del Big Bang, no existe una diferencia radical con respecto al tipo de expansión de las eras posteriores, pero hay algunas teorías nuevas que predicen algo muy distinto. Estas teorías sugieren que hubo un período en que el Universo se expandió con mucha rapidez. Estas ideas son tan importantes que las consideraremos con más detalle en el capítulo 10. De momento, señalaremos que a medida que nos acercamos a las fronteras del conocimiento, cada vez se hace menos posible ser dogmáticos acerca de los detalles de la historia del Universo.

El tiempo de Planck (10^{-43} segundos)

Las incertidumbres teóricas en la descripción de la era GUT son insignificantes por completo comparado con lo que nos espera en el hito de los 10^{-43} segundos después del Big Bang. Este hito es el llamado tiempo de Planck, en honor a Max Planck, el físico alemán que fue uno de los pioneros de la mecánica cuántica.

En este tiempo, la energía de las colisiones había alcanzado los 10^{19} G*e*V, la energía aproximada de un tren de carga lanzado a 100 km/h concentrada en partículas aisladas. El mismo género de argumentos que predijeron las dos unificaciones anteriores nos indica que en esta clase de energías la intensidad de la fuerza gravitatoria pasaría a ser comparable a la de la fuerza fuerte-electrodébil. Si la naturaleza se comporta de la forma esperada, éste sería el tiempo de la primera congelación, el tiempo en que la fuerza gravitatoria se separó de las demás.

Las dificultades para penetrar más allá del tiempo de Planck son prodigiosas, tal como veremos cuando discutamos los intentos teóricos de unificar la gravedad con las demás fuerzas en el capítulo 13. Sin embargo, si estos intentos tienen éxito, los primeros 10^{-43} segundos de la vida del Universo habrían sido un período sencillo y bello en extremo. Habría reacciones que convertirían bosones en fermiones y viceversa, por lo que habría un solo tipo de partícula. La unificación de todas las cuatro fuerzas dejaría sólo un tipo básico de interacción. El Universo tendría, por tanto, la simplicidad suprema:

todas las partículas serian del mismo tipo e interaccionarían entre sí a través de una sola clase de fuerza. Para el físico, esta situación es tan bella y elegante en sí que, sencillamente, la idea tiene que ser cierta. Por supuesto, queda por ver si la naturaleza siente lo mismo.

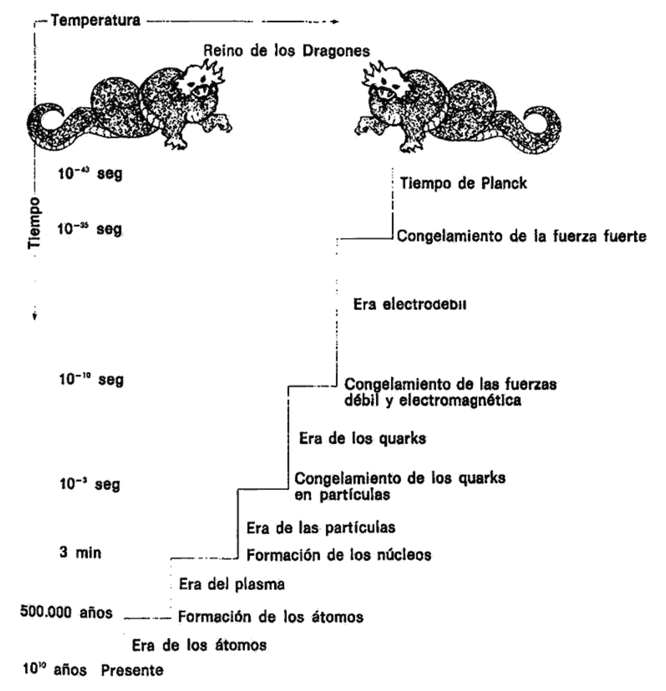


Fig. 43

En cualquier caso, nuestro conocimiento actual del Universo primitivo se resume en la figura 43.

X. INFLACION

Oh, si tuviera las alas de un ángel,
por encima de los muros de esta prisión volaría.

CANCIÓN POPULAR DE LOS APALACHES

EL EFECTO TÚNEL CUÁNTICO

El principal problema sin resolver que encontramos en el capítulo 3, cuando intentamos reconstruir la historia del Universo hasta el momento de la creación, fue el del ritmo de expansión durante y justo después de la era GUT. Para comprender lo que estamos debatiendo, tenemos que conocer una de las propiedades más extrañas de la materia que predice la mecánica cuántica: el efecto túnel.

Si lanzamos una canica dentro de un cuenco, tal como se muestra en la figura 44, pueden suceder dos cosas. Si la canica tiene una velocidad suficiente que le permita rebasar el borde del cuenco, lo abandonará y seguirá su camino. Si no tiene suficiente energía para hacerlo, quedará atrapada. Si no existiera rozamiento, seguiría rodando arriba y abajo en el cuenco, tal como se indica a la derecha.

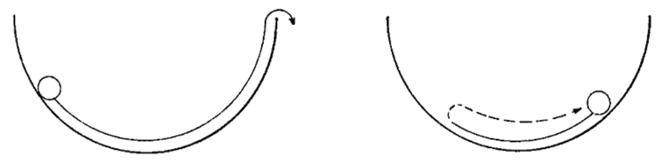


Fig. 44

Podemos representar esta situación utilizando algo que los físicos llaman un diagrama de nivel de energía. En la figura 45 se muestra el diagrama en el caso del cuenco y la canica. La línea curva, cuya forma es necesariamente la misma que la del cuenco, representa la energía que se necesita para llevar la

canica hasta ese punto particular, en contra de la fuerza que la gravedad ejerce hacia abajo. La energía de la canica se representa con una línea recta horizontal. Esta línea es la energía total que comunicamos a la canica cuando la ponemos en el cuenco. Si consideramos su movimiento de vaivén, la intersección de la línea recta con la curva en la figura 45 representa el punto más alto que alcanza cada vez la canica. Si suponemos la ausencia de rozamiento, la energía total de la canica no cambia en su movimiento; esto es lo que se indica al representar la energía por una línea recta en la figura. Lo que sí sucede al rodar la canica arriba y abajo es que cambia la forma en que se manifiesta la energía. En el punto más bajo del cuenco, esta energía es por completo energía de movimiento, o energía cinética, mientras que en el punto más alto de su trayectoria es sólo energía de posición, o energía potencial. En los puntos intermedios hay una mezcla de estos dos tipos de energía. El hecho de que la canica esté atrapada en el cuenco puede deducirse de la figura al observar que la línea horizontal que representa la energía de la canica está por debajo de la energía necesaria para elevar la canica hasta el borde del cuenco.

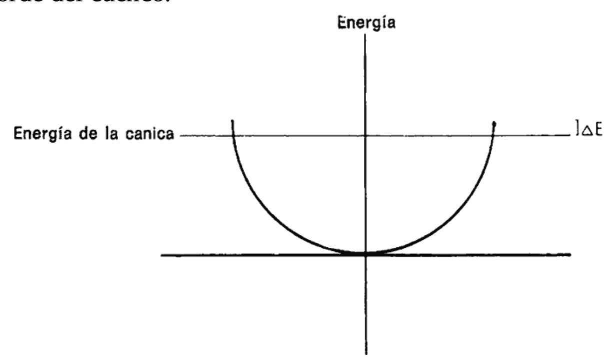


Fig. 45

En nuestra experiencia con los objetos familiares, es todo lo que podríamos decir de la canica y el cuenco. Una vez la canica queda atrapada, lo estará para siempre. Podríamos señalar que la energía de la canica es más alta que la que

tendría si estuviera en reposo encima de la mesa donde está el cuenco, de manera que si la canica pudiera escapar, rodaría alejándose del cuenco. De todos modos, esto es irrelevante, mientras la canica siga confinada.

Sin embargo, si cambiamos la canica por un electrón, nuestros conceptos familiares ya no nos sirven de guía. Si algo han aprendido los físicos, es que hay una diferencia enorme entre el comportamiento de un objeto macroscópico, como una canica, y uno microscópico, como el electrón. Para un electrón, el hecho de que la partícula tenga más energía que la necesaria para estar encima de la mesa es extremadamente significativo, ya que las leyes de la mecánica cuántica indican que existe cierta probabilidad de que el electrón pueda escapar del cuenco.

Esta fuga no es algo que podamos describir con facilidad. Por ejemplo, las leyes de conservación de la energía excluirían una secuencia de acontecimientos en los que el electrón rodara lentamente por el cuenco y pasara por encima del borde. Una imagen más precisa de la predicción de la mecánica cuántica sería pensar que el electrón se filtra o escapa por un túnel a través de la pared del cuenco. Una vez fuera, se encontraría en una zona donde su energía es más alta que la de sus alrededores. En este punto, el electrón caería, convirtiendo su energía potencial en energía de movimiento. Entonces rodaría y se alejaría del cuenco.

Por lo tanto, una partícula cuántica no quedará confinada eternamente en un contenedor, sino que finalmente escapará de él por efecto túnel. Si quisiéramos saber lo que tardaría este proceso, tendríamos que usar la formulación matemática de la mecánica cuántica para obtener una respuesta. Si sólo queremos tener una noción de cómo lo puede predecir la mecánica cuántica, todo lo que necesitamos es el principio de incertidumbre, discutido en el capítulo 5. Recordemos que este principio establece que si AE es la incertidumbre en la energía de una partícula y At la incertidumbre en el tiempo en que posee esta energía, tenemos:

$$\Delta E \times \Delta t \geq h$$

donde h es la constante de Planck.

Esta relación indica que es posible que un sistema cuántico viole la ley estricta de conservación de la energía, siempre que se restablezca el balance de energía en un intervalo de tiempo más corto que Δt. Un proceso así jamás podría detectarse de manera directa, incluso ni en principio, por lo que si ocurriera, no se violaría ninguna ley de la física. Por lo que respecta al electrón en el cuenco, esto significa que hay cierta probabilidad de que, durante cortos períodos de tiempo, adquiera una energía adicional suficiente para situarlo por encima del borde. La energía adicional está indicada por ΔE en la figura 45. De acuerdo con nuestra comprensión del principio de incertidumbre, recordemos que no es imposible que el electrón tenga esta energía extra, siempre que la tenga durante un tiempo suficientemente corto. Puesto que no podemos descartar la posibilidad de que se viole la conservación de la energía en esta escala de tiempo, tenemos que proceder en el supuesto de que este proceso puede ocurrir. Si el electrón tiene una energía adicional ΔE durante un tiempo Δt y si este tiempo es suficiente para que el electrón pase por encima del borde del cuenco, cuando el electrón devuelva su energía adicional y regrese a su estado original, estará fuera del cuenco. Un observador que contemple el proceso verá el electrón dentro del cuenco y de repente, en un tiempo demasiado corto para medirlo, lo verá fuera. Parecerá como si el electrón hubiera pasado por un túnel a través del cuenco, lo que da nombre al fenómeno.

A partir de esta discusión resulta evidente que la capacidad de una partícula para presentar el efecto túnel depende de la forma en que esté confinada. Si la cantidad de energía necesaria para pasar por encima es muy grande, el tiempo durante el cual la partícula puede poseer esta energía es pequeño y la probabilidad de que la partícula pueda salir es reducida. La curva del cuenco o cualquier otro mecanismo restrictivo en un diagrama de energía recibe el nombre de barrera de potencial. Cuanto más alta es la barrera de potencial menos fácil es que la partícula escape. Del mismo modo,

un potencial bajo pero amplio también hace más difícil el efecto túnel, ya que aumenta la distancia que debe recorrer la partícula en el tiempo permitido Δt.

Existen en la naturaleza muchos ejemplos del efecto túnel cuántico. Algunos transistores, por ejemplo, usan este efecto para que los electrones se desplacen de una parte del dispositivo a la otra. Otro ejemplo, un poco más fácil de imaginar, es la desintegración de algunos núcleos, como el del uranio. Estos núcleos se desintegran con la emisión de una partícula constituida por dos protones y dos neutrones. Este conjunto, conocido como partícula alfa, es en realidad el núcleo de un átomo de helio corriente. Podemos imaginar el proceso de desintegración tal como se muestra en la figura 46: la partícula alfa se encuentra atrapada en el núcleo y retenida allí por la fuerza fuerte. Para escapar del uranio, su energía tendría que ser más alta que la barrera creada por dicha fuerza. La analogía con el cuenco y la canica resulta evidente.

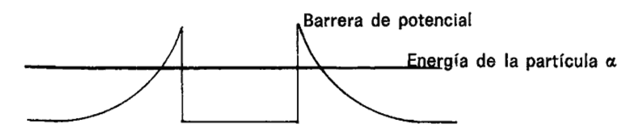


Fig. 46

Lo que sucede en el núcleo de uranio es que la partícula alfa escapará finalmente por efecto túnel, y convertirá su energía potencial en energía de movimiento una vez lo haya hecho. Un observador que vigilara el núcleo vería una desintegración espontánea: el núcleo de uranio emitiría de repente una partícula alfa en rápido movimiento y se convertiría, en el proceso, en un núcleo de torio. En el caso del uranio, la cantidad de energía necesaria para superar la barrera es tan alta y esta barrera es tan amplia, que resulta muy poco probable que ocurra el efecto túnel. Ésta es la razón de que la vida media del núcleo de uranio sea de varios miles de millones de años. Otros núcleos tienen barreras más bajas y por consiguiente tiempos de vida más cortos. Añadiremos de pasada que el efecto túnel de partículas alfa es sólo una de las muchas formas en que puede ocurrir la desintegración radiactiva. Otras

formas son parecidas a la desintegración del protón discutida en el capítulo 8, que se produce a través del intercambio de partículas virtuales.

Aunque hemos empezado nuestra discusión sobre el efecto túnel con el ejemplo mecánico del cuenco y de la canica, donde la energía potencial asociada con la barrera era estrictamente gravitatoria, es obvio que el efecto túnel será ubicuo a nivel cuántico y que los argumentos basados en el principio de incertidumbre pueden aplicarse a cualquier sistema cuántico. En la desintegración alfa del uranio, por ejemplo, la barrera de potencial que tiene que superar la partícula para escapar del núcleo es producida por la fuerza fuerte y no por la gravedad. En el caso del transistor, las fuerzas eléctricas de los átomos del material son las que producen la barrera que tienen que atravesar los electrones por efecto túnel. A nivel de los quarks, son las fuerzas entre cargas de color las que producen una barrera de potencial que impide a los quarks abandonar las partículas elementales. En este caso, sin embargo, la barrera tiene una altura infinita, por lo que los quarks no pueden escapar nunca.

EL FALSO VACÍO

El segundo concepto importante que tenemos que dominar antes de discutir el ritmo de expansión del Universo primitivo es el del falso vacío. Igual que buena parte de la física que gobierna los primeros 10^{-35} segundos del Universo, ésta es una idea muy abstracta que se comprende mejor en términos de una analogía con sistemas más simples y familiares. La analogía que utilizaremos aquí será la del imán de hierro corriente.

Todo átomo de hierro puede considerarse como un diminuto imán con un polo norte y un polo sur. El campo magnético de un fragmento corriente de hierro magnetizado, como el que se usa para sujetar notas en la puerta de la nevera o el que forma la aguja de una brújula, es simplemente la suma total de los campos magnéticos asociados con cada átomo de

hierro. Un efecto a gran escala como éste sólo es posible si un gran número de átomos están alineados de forma que sus polos norte estén en la misma dirección. Cuando sucede esto, decimos que hay una magnetización neta del hierro.

Si consideramos ahora una pieza de hierro que ha sido calentada y nos preguntamos qué aspecto tiene la energía del sistema, obtendremos un gráfico como el de la figura 47. A causa del calentamiento, toda alineación de los imanes atómicos quedará destruida. Los imanes atómicos apuntarán hacia direcciones al azar y no habrá una magnetización neta. Esta situación se manifiesta en el gráfico por el hecho de que la energía mínima para el sistema —aquella hacia la cual las leyes de la física nos dicen que el sistema evolucionará— es el estado de magnetización neta cero. Si queremos dar una magnetización al sistema tenemos que actuar desde el exterior y alinear algunos de los imanes atómicos. Al llevar a cabo esta tarea, estaremos añadiendo necesariamente la energía indispensable para crear las alineaciones, por lo que el hierro caliente con una magnetización neta debe tener necesariamente una energía total más alta que con los átomos orientados al azar. Los físicos representan el hierro con una curva de energía como la de la figura 47, exactamente de la misma manera que la canica en el cuenco; la única diferencia es el significado que atribuimos a la curva de energía potencial. En el ejemplo de la canica, la curva representaba la energía que había que suministrar para superar la fuerza de gravedad al objeto de situar la canica en un punto determinado.

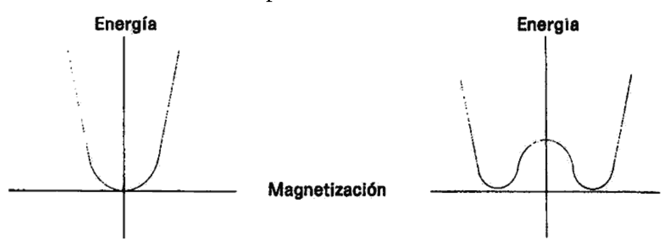


Fig. 47

Supongamos ahora que disminuimos la energía del hierro dejando que se enfríe. A la temperatura de unos 800°C (cono-

cida como temperatura de Curie), la curva de energía experimentará una súbita transformación. Pasará de ser una curva cóncava como la de la izquierda de la figura 47, a tener una forma más irregular como la de la derecha. En este caso, el estado de mínima energía no corresponde a una magnetización cero, sino a determinado valor distinto de cero. El proceso responsable del cambio de la curva de potencial es simple: a la temperatura de Curie, la interacción entre los átomos es de tal especie que ellos mismos tienden a alinearse, proceso que produce un campo magnético. No se necesita ninguna intervención desde fuera para conseguir esta alineación; se produce espontáneamente cuando la temperatura es la correcta. La transición desde una colección desordenada de átomos al conjunto de átomos alineados que constituye un imán es lo que hemos llamado una transición de fase de segunda especie. No hay un cambio global de la energía del sistema en el proceso, sino el establecimiento de un orden entre los átomos, con la consiguiente redistribución de energía entre éstos y el campo magnético.

Cabe señalar de pasada que este análisis de la formación de un imán nos proporciona otra manera de considerar el proceso de rotura espontánea de la simetría discutido en los capítulos 6 y 7. Por encima de la temperatura de Curie existe en el sistema un alto grado de simetría. Todas las direcciones son iguales, en el sentido de que en cualquier dirección que miremos, no vemos ninguna magnetización neta. Por debajo de la temperatura de Curie hay una dirección privilegiada del espacio: la dirección definida por los polos norte y sur del imán. A la temperatura de Curie se rompe la simetría sin ninguna interferencia de agentes exteriores, hecho que explica el uso de la palabra *espontánea.*

Aunque los físicos no suelen usar este tipo de lenguaje, hay otra manera de describir el estado magnetizado del hierro. Si nos dejáramos guiar por nuestra intuición sobre el comportamiento del hierro por encima de la temperatura de Curie, deberíamos insistir en que el verdadero estado fundamental del hierro tiene que ser el asociado con una magnetización cero. Si éste fuera el caso, diríamos que por debajo de la tem-

peratura de Curie el hierro cae en un falso estado fundamental, un estado de energía mínima, sin duda, pero un estado que no cumple el requisito intuitivo de magnetización cero. Esta forma de considerarlo es importante al tratar del Universo primitivo.

Para hacer la transición de un imán al Universo durante la era GUT, tenemos que reemplazar el campo magnético familiar por otro menos conocido. Este campo magnético, llamado campo de Higgs en honor a su creador, el físico británico Peter Higgs, tiene la propiedad de desaparecer a temperaturas muy altas, cuando se unifican las fuerzas fuerte y electrodébil. Por debajo de la temperatura análoga a la temperatura de Curie (una temperatura alcanzada por el Universo a los 10^{-35} segundos), se establece en el Universo un campo de Higgs neto y se rompe la simetría. La curva de energía del Universo en función del campo de Higgs se muestra a la izquierda de la figura 48 para temperaturas características de tiempos anteriores a los 10^{-35} segundos, y es parecida a la curva correspondiente para el hierro por encima de la temperatura de Curie. A temperaturas elevadas esperamos que el Universo tenga un campo de Higgs neto cero, igual que esperamos que el hierro a temperaturas elevadas tenga una magnetización neta cero. Al expandirse, el Universo se enfría, y por debajo de una temperatura crítica la curva de energía se convierte en la que se muestra a la derecha de la figura 48. Es la análoga a la curva para el hierro por debajo de la temperatura de Curie. El estado de energía mínima del Universo no corresponde a un valor cero del campo de Higgs, tal como sería para temperaturas más altas, sino a un determinado valor distinto de cero. Del mismo modo que en el hierro aparece espontáneamente un campo magnético, en el Universo primitivo apareció espontáneamente un campo de Higgs. El Universo entra en el estado indicado por el punto marcado A en la figura 48, un estado que los físicos llaman falso vacío. El nombre se debe a que no es el estado de energía más bajo que podría tener el sistema. Esa distinción pertenece al valle más bajo, marcado B. El Universo, igual que la canica en el cuenco, está atrapado en un pozo de potencial en A, del cual, según la física clásica,

no puede escapar hacia un nivel de menor energía, del mismo modo que según la física clásica la canica no puede alcanzar la mesa en nuestro ejemplo inicial.

En el falso vacío, la mayor parte de la energía del Universo está inmovilizada en el campo de Higgs y muy poca aparece como materia en el sentido ordinario. Esto es análogo a la conversión de una parte de la energía de los átomos de hierro en energía del campo magnético en un imán.

EL MODELO INFLACIONARIO

El efecto túnel cuántico y el falso vacío se combinan para dar lugar a algunas de las teorías más interesantes de hoy sobre el Universo primitivo. Estas teorías reciben el nombre genérico de teorías del Universo inflacionario. Su idea básica es que el Universo entra en un estado de falso vacío como el que acabamos de discutir muy poco después del Big Bang y después escapa de él por efecto túnel. (Esto puede imaginarse como un proceso por el que las partículas del Universo escapan una a una por efecto túnel.) Resulta que cuando el Universo está en el falso vacío, se expande (sufre una inflación) con mucha más rapidez de lo que cabría esperar, que es de donde surge el nombre de la teoría.

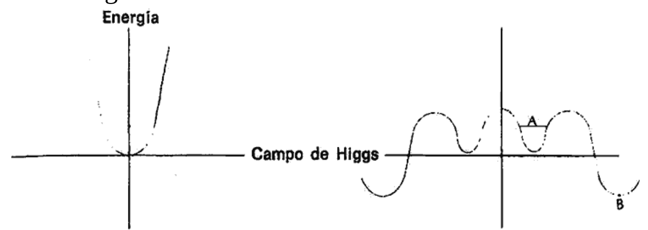


Fig. 48

El hecho de si el Universo llega a entrar en un estado de falso vacío depende de si aparece el tipo peculiar de pozo ejemplarizado por el punto A de la figura 48 en la curva de energía potencial. La respuesta a esta cuestión depende de los detalles de las hipótesis que los teóricos establecen sobre las

interacciones en el Universo entre el tiempo de Planck y la congelación GUT. Puesto que no hay manera de medir esas interacciones a tan altas energías, no existe ninguna respuesta "correcta" de los experimentos. Pero, siempre que un teórico no cometa algún error extraordinario, como por ejemplo, producir una teoría que viole la simetría gauge básica, tiene libertad para cambiar los parámetros de su potencial a voluntad. Sería como si los teóricos que tratasen de explicar el origen de los imanes no pudieran ver jamás ningún átomo de hierro ni ningún imán, y pudieran escoger, por tanto, cualquier valor que quisieran para describir las interacciones entre los átomos. Esta escasez de restricciones significa que debemos comparar las teorías por su capacidad para producir resultados satisfactorios y para evitar contradicciones con hechos conocidos del Universo. Parece ser que las teorías que predicen la presencia de falsos vacíos satisfacen este criterio.

En estas teorías, el Universo entra realmente en el estado de falso vacío. La mayor parte de la energía se destina a la creación del campo de Higgs. Las ecuaciones de la relatividad general, cuando se aplican a un sistema de este tipo, predicen un comportamiento bastante extraño. En lugar del tipo de expansión normal del Universo, en el que el radio aumenta de una forma bastante pausada al correr del tiempo, la expansión será mucho más rápida. De hecho, la teoría predice que el radio de curvatura del Universo aumentará exponencialmente. La diferencia entre el aumento normal y el exponencial es sorprendente. Si la expansión del Universo fuera normal (es decir, si estuviera gobernada por las mismas ecuaciones durante la congelación GUT que durante el tiempo posterior), cabría esperar un aumento de su tamaño de ocho veces durante el tiempo en que el Universo se encuentra en el estado de falso vacío. En cambio, nos enfrentamos con una situación en la que el Universo dobla su tamaño casi setenta veces en un intervalo de sólo unos 10^{-35} segundos. Esta hiperexpansión es la que llamamos inflación del Universo. Las teorías que predicen este tipo de expansión rápida se llaman inflacionarias.

Del mismo modo que una canica ordinaria no puede escapar jamás de un cuenco ordinario, el Universo no podría

abandonar nunca el estado de falso vacío si obedeciera las leyes de la física clásica. Sabemos, sin embargo, que una canica mecanicocuántica podría escapar por efecto túnel fuera del cuenco y, exactamente de la misma manera, imaginamos que el Universo experimenta el mismo efecto, que lo lleva fuera del estado de falso vacío. Al hacerlo, se encuentra en una situación en la que su energía es más alta que la curva de energía potencial. Igual que la canica convertía su exceso de energía en otra forma, también se convierte este exceso de energía del Universo primitivo. La única diferencia entre el Universo y la canica es que el primero convierte su exceso de energía en masa en lugar de energía de movimiento. De hecho, en los modelos inflacionarios la mayor parte de la mase se crea cuando la energía del campo de Higgs se "vuelca" después que el Universo escape del falso vacío.

Aunque este modelo es muy distinto de la expansión suave y uniforme de la imagen normal del Big Bang, no deja de ser razonable. Después de todo, hemos visto una congelación tras otra en la historia del Universo, y cabría esperar que por lo menos una de ellas tuviera un efecto en la expansión global. Esto es especialmente cierto en el período primitivo que discutimos aquí, en el que la alta densidad de materia y la alta temperatura producirían efectos que ya no observamos en nuestra era actual, fría y diluida.

Por lo tanto, desde nuestro punto de vista, el modelo inflacionario tiene dos consecuencias importantes para nuestra imagen del Universo entre el tiempo de Planck y la congelación GUT. Primero, implica que el Universo en el tiempo de Planck era mucho más pequeño de lo que hubiéramos pensado al extrapolar simplemente hacia atrás la expansión universal observada. Si no fuera así, entonces la inflación hubiera creado un universo mucho mayor que el que creemos que existía a los 10^{-35} segundos.

Segundo, el proceso cuántico del efecto túnel y la subsiguiente creación de materia, considerado actualmente como un "volcado" de energía cuando el sistema emerge de la barrera de potencial, nos proporciona una herramienta teórica para tratar la cuestión de la cantidad de materia del Universo.

Igual que podemos calcular la energía potencial que una canica convertirá en energía de movimiento cuando escapa por efecto túnel a través del cuenco, podemos también calcular la cantidad de energía que se convierte en masa cuando el Universo abandona el falso vacío. Ésta es la primera indicación de que podríamos ser capaces de usar las teorías de la gran unificación para tratar cuestiones verdaderamente fundamentales de la estructura del Universo.

EL NUEVO MODELO INFLACIONARIO

Lo que hemos descrito hasta ahora es una teoría del Universo primitivo en el que se produce la inflación a causa de la presencia de un falso vacío y del efecto túnel. En estas teorías, la inflación del Universo ocurre durante la etapa de falso vacío. Como cabría esperar, sin embargo, ésta no es la única teoría que examinan los físicos interesados en comprender la congelación GUT. A finales de 1982, Alan Guth, del MIT, el creador del modelo original inflacionario, propuso una imagen alternativa del proceso, que se tituló "nuevo modelo inflacionario".

El nuevo modelo inflacionario difiere de lo que hemos discutido hasta ahora en dos puntos importantes. Primero, aunque haya un falso vacío, desempeña un papel mucho menos crucial en el nuevo modelo inflacionario que en la vieja teoría. Segundo, en el nuevo modelo inflacionario, el Universo entero se congela en un solo dominio, por lo que no es necesario que se forme la estructura grumosa de la figura 40. Vamos a considerar estos dos puntos por separado.

El tipo de estructura en valles y montañas de la curva de energía de la figura 48 garantiza que el Universo permanecerá en el falso vacío durante algún tiempo. En el nuevo modelo inflacionario, se cambian las interacciones que se postulan entre las partículas, de forma que la curva de energía tiene un aspecto más parecido al que se muestra en la figura 49. Un pequeño valle cerca del cero se combina con una pendiente muy larga que cae lentamente hacia un mínimo. En este caso,

las partículas escapan con mucha rapidez por efecto túnel del somero falso vacío, pero luego convierten lentamente su energía en masa al "ir rodando cuesta abajo por la colina de la energía". Resulta que las condiciones durante este lento proceso son tales que se produce una rápida inflación, igual que en el modelo viejo.

Uno de los problemas de la idea de una congelación del Universo en dominios separados es que la mayoría de versiones de la teoría predicen entonces la creación de muchos monopolos magnéticos. En realidad, algunas predicen que tendría que haber tantos monopolos como protones en el Universo. En el capítulo 12 discutiremos con detalle la búsqueda de monopolos, pero sabemos que si están presentes en el Universo de hoy, no lo están en gran número. En el nuevo modelo inflacionario, las interacciones que conducen a la curva de energía de la figura 49 predicen también un proceso de congelación mucho más suave y por lo tanto menos defectos de todo tipo, incluidos los monopolos.

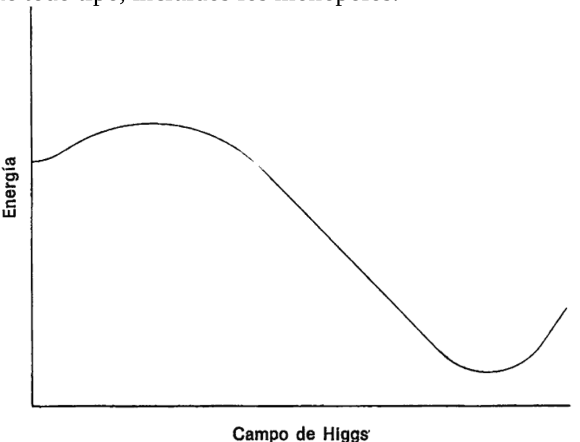


Fig. 49

Como ya dijimos al principio de esta discusión, los detalles de cómo ocurrió la congelación GUT son todavía un tema de vivo debate entre los científicos. Espero que esta breve comparación de dos teorías distintas dará alguna idea de có-

mo se lleva a cabo este debate y de qué tipos de cambios pueden sufrir nuestras teorías con el desarrollo de nuevas ideas.

XI. RESOLVIENDO LOS PROBLEMAS DEL BIG BANG

Todo *es para el bien en el mejor de los mundos posibles.*

VOLTAIRE
Cándido

En el capítulo 3 describimos las cuatro dificultades básicas del modelo normal del Big Bang. A menos que recurramos a hipótesis arbitrarias, es imposible explicar: 1) la ausencia de antimateria en el Universo, 2) la formación de galaxias, 3) la naturaleza isótropa de la radiación de fondo cósmica y 4) por qué el Universo está tan cerca de ser cerrado. Señalamos entonces que nada en nuestro conocimiento de las leyes de la física que habían operado en el Universo desde que tenía 1 milisegundo de edad podía damos una explicación de estos fenómenos. Señalamos también que cualquier explicación tendría que implicar unos procesos físicos que tuvieron lugar en el transcurso de este crucial primer milisegundo.

Ahora ya hemos estudiado la historia del Universo lo mejor que podemos hasta el tiempo de Planck. Sabemos muchísimo más de su evolución que hace una década. Ya es hora de volver a examinar esos cuatro problemas a la luz de nuestros conocimientos nuevos.

EL PROBLEMA DE LA ANTIMATERIA

Al principio de la era de las partículas, ya había una preponderancia de materia sobre antimateria en el Universo. Este desequilibrio no era entonces tan sorprendente como lo es ahora. En lugar de la actual ausencia (o casi ausencia) de antimateria, a 1 milisegundo había aproximadamente mil millones y un protones por cada mil millones de antiprotones. Un observador que viviera en aquel tiempo no se habría sor-

prendido tanto por esta asimetría fundamental como nos sorprendemos hoy, pero el protón de más por cada mil millones de pares de protones y antiprotones es el responsable de todos los objetos materiales que vemos en el Universo. El problema que debemos afrontar es, por tanto, comprender cómo pudo haber surgido este ligero desequilibrio durante las congelaciones sucesivas del Universo anteriores a la era de las partículas.

Si empezamos con un universo en que materia y antimateria aparecen en cantidades iguales, hay algunos principios fundamentales de la física que parecen indicar que nunca podremos generar un exceso de materia o de antimateria. Virtualmente todas las reacciones de partículas que podemos observar en el laboratorio son simétricas entre materia y antimateria. Es decir, si una reacción produce un protón adicional, producirá también un antiprotón adicional, de modo que el número bariónico neto (protones menos antiprotones) del Universo permanece constante. Si este hecho fuera universalmente cierto, entonces la única manera de producir el Universo que vemos hubiera sido que en el Big Bang se hubiera creado una cantidad preponderante de materia. Sin embargo, da la casualidad que la GUT, asociada con algunos trabajos experimentales muy precisos, nos muestra cómo solucionar este problema.

La razón de que los físicos muestren una fuerte tendencia a creer en la absoluta simetría entre materia y antimateria tiene que ver con algo llamado simetría CPT. Esta simetría puede imaginarse de la manera siguiente: supongamos que miramos una película de una reacción entre partículas y luego cambiamos cada partícula por su antipartícula, damos vuelta a la película de manera que la derecha y la izquierda se intercambien y la pasamos hacia atrás. El teorema CPT establece que las leyes de la naturaleza que se deducen de la película resultante de estas manipulaciones serán indistinguibles de las que se derivan de la película original. Es una aseveración muy fuerte en física, ya que todas las teorías que obedecen el principio de relatividad y los postulados básicos de la mecánica cuántica, tienen que predecir este resultado. Las tres opera-

ciones descritas se denominan: 1) conjugación de carga (es la C de *CPT* y corresponde a cambiar partículas por antipartículas), 2) paridad, o *P* (intercambio derecha-izquierda) y 3) inversión temporal o T (pasar la película hacia atrás). Antes de 1954, los físicos creían que la manera como se obtenía la simetría CPT en la naturaleza era que cada una de las tres operaciones, en sí y por sí misma, representaba una simetría intacta. Así, la operación de paridad, que intercambia derecha e izquierda, se creía que implicaba que no había manera de distinguir entre derecha e izquierda a nivel de las interacciones de las partículas, que todas las leyes de la física tendrían el mismo aspecto vistas directamente o vistas en un espejo. Pero en 1954, dos jóvenes físicos teóricos, T. D. Lee y C. N. Yang, de la Columbia University, señalaron en un brillante artículo que, aunque la mayoría de las interacciones de la naturaleza parece que tengan lugar de forma tal que la paridad queda intacta, no hay razón para que esto tenga que ser siempre así. Era del todo posible que la naturaleza no fuera invariante bajo la operación de paridad. Todo lo que se requería es que si no lo era, se tendría que violar también la conjugación de carga, la inversión de tiempo o ambas. Las violaciones asociadas con las diferentes simetrías se tendrían que combinar de forma tal que se anularan entre sí y dejaran la naturaleza invariante bajo la operación CPT combinada. Cuando se verificó en el laboratorio la conjetura de Lee y Yang sobre la rotura de paridad, éstos se convirtieron en los hombres más jóvenes de la historia (en 1957) galardonados con el premio Nobel.

Durante un tiempo después de la caída de la paridad, los físicos creyeron que todos los efectos de la violación de paridad serían compensados por violaciones de la conjugación de carga, de manera que la operación combinada que hemos llamado CP sería una buena simetría. Si esto fuera cierto, significaría que las leyes de la física obtenidas de la observación directa de reacciones serían indistinguibles de las obtenidas de la observación de reacciones en las que las partículas han sido sustituidas por antipartículas y la derecha por la izquierda. Por otra parte, como sabemos que CPT tiene que

ser una buena simetría, esto implicaría que la naturaleza tiene que exhibir las mismas leyes tanto si viéramos la película hacia delante como hacia atrás. Si éste fuera el caso, las leyes de la naturaleza serían realmente simétricas entre partículas y antipartículas y no habría ninguna posibilidad de que se desarrollara un universo como el nuestro a partir de uno que tuviera al comienzo igual cantidad de materia y de antimateria.

En 1964, James Cronin y Val Fitch, de la Princeton University, anunciaron los resultados de una serie de cuidadosos experimentos que demostraban que por lo menos un fenómeno de la naturaleza —la desintegración de una partícula llamada mesón $K°_L$— no era invariante bajo la operación CP. Con claridad, la naturaleza ha optado por mantener la CPT válida, pero ha dispuesto las cosas de forma que las leyes de la física no sean invariantes bajo C, P y T tomadas por separado. Por este descubrimiento, Cronin y Fitch compartieron el premio Nobel en 1980.

Este descubrimiento fue seguido de inmediato por otro que tiene una relación evidente con el problema de la antimateria. El $K°_L$ se desintegra más a menudo en un positrón más otras partículas que en un electrón más otras partículas. El $K°_L$ es una de las pocas partículas de la naturaleza en las que la partícula y la antipartícula son idénticas. Es, en otras palabras, su propia antipartícula. Si la materia y la antimateria son siempre intercambiables, deberíamos esperar que el $K°_L$ se desintegrara en materia y antimateria exactamente en la misma proporción. Cada vez que aparece un positrón entre los productos finales, deberíamos esperar encontrar otra desintegración en la que apareciera un electrón. El hecho de que esto no sea lo que sucede significa que aquí, por vez primera, observamos un proceso que no mide la materia y la antimateria por el mismo rasero. Esto es alentador, porque nos da esperanza de que podamos construir nuestras teorías de tal modo que se pueda generar una preponderancia de materia en el Universo primitivo.

De hecho, esto es lo que hicieron unos cuantos teóricos a finales de los años setenta. El razonamiento es, en realidad, muy sencillo. Antes de la congelación GUT, el Universo

estaba lleno de bosones X y quarks. Cada vez que se desintegraba una partícula X en un punto, se creaba otra en una colisión en algún otro sitio. Lo mismo sucedía con la antipartícula, el X. Si el Universo empezó con igual cantidad de materia que de antimateria, nada que hubiera sucedido antes de la congelación GUT habría destruido el equilibrio. Supongamos, a modo de ejemplo, que la desintegración de los X produjera 2.000 millones de quarks y 1.000 millones de antiquarks. Si se mantiene la simetría materia-antimateria, esperaríamos que la desintegración de los $\overline{\mathrm{X}}$ produjera 1.000 millones de quarks y 2.000 millones de antiquarks. El efecto neto de la desintegración de los X y $\overline{\mathrm{X}}$ sería, entonces, un universo que contendría 3.000 millones de quarks y 3.000 millones de antiquarks, es decir, un universo sin preponderancia de la materia sobre la antimateria. Si el Universo emerge de la congelación GUT en este estado, no conocemos ningún proceso subsiguiente que pueda alterar este equilibrio. Por lo tanto, si queremos resolver el problema de la antimateria, debemos considerar con más detalle la congelación GUT.

La desintegración del K°_{L} puede damos alguna idea de cómo puede haber ocurrido esta congelación. Sabemos que es posible que pueda romperse el equilibrio entre materia y antimateria en la naturaleza. Los teóricos han podido demostrar que el mismo tipo de procesos que llevan a este resultado en la desintegración del K°_{L} pueden producirse en la desintegración de las partículas X justo después de la congelación GUT. En otras palabras, del mismo modo que la desintegración del K°_{L} produce más antimateria que materia, la desintegración de un X y un $\overline{\mathrm{X}}$ puede producir más materia que antimateria. No es difícil mostrar que la GUT puede arreglar fácilmente el pequeño exceso de materia respecto a antimateria que necesitamos para explicar el Universo actual.

La explicación se desarrollaría de la forma siguiente. En el momento de la congelación, había igual número de X y de $\overline{\mathrm{X}}$ en el Universo. Justo después de la congelación, cesó la posibilidad de que se produjeran más partículas en colisiones y empezaron a desintegrarse. Supongamos, en aras del razonamiento, que la desintegración de una sola partícula X produje-

ra mil millones y un quarks junto con mil millones de antiquarks. La teoría predice entonces que la correspondiente desintegración del X produciría mil millones de antiquarks y mil millones de quarks. En este caso, la desintegración del par habría producido un pequeño exceso de materia sobre antimateria, justo lo suficiente, de hecho, para explicar el Universo observado. El resultado neto de sumar todas las formas posibles de desintegración del X y el $\overline{X}$ es que muy al principio de la era electrodébil el Universo se encontró con un exceso de materia sobre antimateria, aunque entró en la era sin este exceso. La razón de esta situación es que las partículas X, igual que el K°_{L} que observamos en nuestros laboratorios, se desintegra por la vía de un proceso que viola la simetría casi universal entre materia y antimateria. Ambos procesos —el que podemos medir y el que no— vienen descritos por la misma teoría, por lo que podemos discutir la desintegración de los bosones X en el Universo primitivo sin introducir ninguna hipótesis *ad hoc*.

Una vez se han desintegrado los mesones X y $\overline{X}$, ya no existen procesos que puedan cambiar el número bariónico neto del Universo. El exceso de materia sobre antimateria queda congelado en la estructura del Universo. Todo lo que sucede en las eras subsiguientes es que la materia y la antimateria se aniquilan una a otra hasta que desaparece la antimateria, y queda un Universo formado sólo por materia. Por lo tanto, una de las dificultades más molestas del modelo convencional de Big Bang puede resolverse si comprendemos los detalles de los procesos de partículas que ocurrieron cuando el Universo tenía una edad de 10^{-35} segundos.

EL PROBLEMA DE LA FORMACIÓN DE LAS GALAXIAS

Para que las galaxias se formaran por el proceso de acreción gravitatoria que describimos en el capítulo 3, era preciso que, al comienzo de la era actual, el Universo presentara irregularidades. Estas irregularidades habrían tomado la forma de regiones del espacio donde la densidad de materia era

superior a la media. Tales regiones habrían actuado como núcleos alrededor de los cuales se habrían condensado las galaxias, igual que las partículas de polvo del aire actúan como núcleos para la condensación de gotas de lluvia. Para producir este efecto, las irregularidades tenían que estar presentes en la congelación más reciente, 500.000 años después del Big Bang.

Los agrupamientos de materia no tenían que ser muy grandes. De hecho, para que las galaxias se formaran, sólo era necesario que hubiera regiones del espacio donde la densidad fuera un 0,01% más alta de lo normal, una concentración minúscula. A modo de referencia, una concentración de densidad del 0,01% sería análoga a una ola de 3 mm de altura en un lago de 30 m de profundidad.

El problema de la formación de las galaxias no es, por tanto, el de producir galaxias acabadas del todo antes de los 500.000 años. Todo lo que se requería era que, en aquel momento, hubiera unas irregularidades a nivel del 0,01%, que hubieran sido creadas con anterioridad y que hubieran logrado sobrevivir. La palabra clave es *sobrevivir*. El Universo primitivo era lo que los físicos llaman un sistema disipativo. En estos sistemas, las perturbaciones locales se atenúan rápidamente y no sobreviven mucho tiempo. Una buena analogía es imaginar una roca solitaria en medio de un río ancho. La roca crea ondas en el agua (perturbaciones locales), pero a medida que las seguimos corriente abajo, se atenúan y acaban desvaneciéndose en el plácido flujo general. Decimos que el río disipa la perturbación.

Es difícil de imaginar que algo tan dinámico como el Big Bang funcione con suavidad y no produzca perturbaciones locales. No conozco a nadie que haya argumentado con seriedad que éste sea el caso. Lo que se argumenta, sin embargo, es que cualquier perturbación producida en el Universo primitivo se desvanecerá como las ondas en el río y dejará el Universo sin los núcleos necesarios a cuyo alrededor se podían formar las galaxias. Lo que se requiere no es tanto la creación de tales núcleos en los primeros 500.000 años, sino su preservación durante este largo período de tiempo. En el modelo

convencional de Big Bang, estos núcleos no los puede producir ningún proceso natural, por lo que tienen que presentarse en una hipótesis especial.

Sin embargo, nuestro nuevo conocimiento de la congelación GUT nos permite hacer algo mejor. Sabemos que durante esta congelación se formaron ciertos tipos de estructuras y que estas estructuras podían tener una masa considerable. Desde el punto de vista de la formación de las galaxias, las estructuras más importantes de éstas eran las cuerdas, objetos unidimensionales largos y muy masivos. Las cuerdas son una de las clases de defectos que aparecieron en la congelación GUT y que discutimos en el capítulo 9. Los teóricos han trazado la historia de estas cuerdas desde los 10^{-35} segundos y han hecho algunos descubrimientos bastante interesantes. Utilizando conceptos de la rama de las matemáticas conocida como topología (el estudio de las formas), han demostrado que unas cuerdas como las que se muestran en la figura 50 son estables y podría esperarse que sobrevivieran durante largos períodos. Puede haber también otros tipos importantes de cuerdas estables; éste es un campo de la física enteramente nuevo, que no ha sido aún explorado por completo.



Fig. 50

En cualquier caso, estos estudios muestran que es posible en teoría que los defectos formados durante la congelación GUT pudieran sobrevivir durante los 500.000 años siguientes y tuvieran, entonces, la masa justa suficiente para proporcionar las concentraciones del 0,01% necesarias para iniciar la condensación de las galaxias. Así, en esta versión de la creación, las galaxias se forman muy rápidamente después de que los electrones y los núcleos se junten para formar los átomos, y se evita la dificultad planteada anteriormente. El problema de la formación de las galaxias, igual que el problema de la antimateria, se resuelve con una mejor comprensión del com-

portamiento del Universo durante sus primeros 10^{-35} segundos de vida.

Señalemos de pasada que esta explicación particular de la formación de las galaxias depende de la formación de defectos de cuerda en la congelación GUT. Sin embargo, no es esencial que los núcleos a cuyo alrededor se condensan las galaxias se formen precisamente de esta manera. En el nuevo modelo inflacionario, por ejemplo, no se crean defectos de cuerda, pero se forman otros tipos de concentraciones de masa por procesos mecanicocuánticos durante este período de rápida expansión. En ambos casos, el resultado final es el mismo: las galaxias se forman rápidamente una vez el plasma se ha congelado en átomos.

De este resultado se desprende una lección importante, no sólo para la física, sino para la ciencia en general. Desde principios de los años setenta ha habido un resurgimiento del creacionismo bíblico en Estados Unidos. Este movimiento, bajo el nombre de *ciencia de la creación,* ha recogido una gran cantidad de argumentos acerca de los fallos de la teoría de la evolución. Estos argumentos no se han limitado a críticas de Darwin, sino que se han extendido hasta incluir también todo el concepto del Universo en evolución. Un elemento importante de su argumentación ha sido el fracaso de la cosmología convencional para resolver el problema de la creación de las galaxias.

No obstante, con el desarrollo de la GUT, vemos que la formación de las galaxias deja de ser un problema y es simple mente un fenómeno natural más, con una explicación perfectamente natural. El argumento creacionista falla porque supone tácitamente que si un proceso no se puede explicar hoy, jamás podrá ser explicado en el futuro. Esta línea de razonamiento falla en el caso de la formación de las galaxias —como falla en muchas otras áreas de la ciencia de la creación— porque las fronteras del conocimiento avanzan a menudo con mucha rapidez. Nunca da resultado fundamentar una posición filosófica en lo que no saben los científicos.

EL PROBLEMA DEL HORIZONTE

El hecho observacional que conduce al problema del horizonte es simple: si observamos la radiación de fondo cósmica que llega a la Tierra desde distintas direcciones, encontramos que es isótropa hasta una diezmilésima. Esto implica que la parte del Universo situada ahora por encima del polo Norte estuvo alguna vez en comunicación con la parte situada ahora por encima del polo Sur, ya que ambas partes tienen que haber establecido el equilibrio térmico en algún momento del pasado. El problema surge del hecho que, en la imagen convencional del Big Bang, no hubo nunca ningún momento en el pasado en el que se hubiera podido establecer universalmente este equilibrio, incluso ni mediante señales que viajaran a la velocidad de la luz.

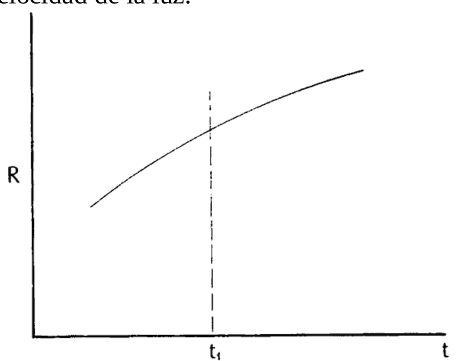


Fig. 51

Podemos representar este problema como se indica en la figura 51. Trazamos el radio de curvatura del Universo primitivo en función del tiempo. En este gráfico, se representa la expansión universal mediante el aumento del radio al transcurrir el tiempo. A partir de este gráfico, podemos encontrar el radio de curvatura que corresponde a cualquier momento del pasado (p. ej., el tiempo marcado con t_1 en la figura 51). Si usamos este radio como una medida aproximada del tamaño del Universo en el instante t_1, es relativamente sencillo descubrir si el radio en el tiempo t_1 era lo suficiente pequeño para

que la luz pudiera viajar de un punto cualquiera del Universo a otro antes de que la expansión desplazara el punto objetivo demasiado lejos. En términos de este gráfico, el problema del horizonte puede enunciarse de esta manera: en el Universo primitivo, el radio de curvatura era demasiado grande para permitir la comunicación entre regiones alejadas. En otras palabras, el Universo fue siempre demasiado grande para que se estableciera el equilibrio, incluso en las primeras etapas después del Big Bang.

Pero en el capítulo 10 vimos que este aumento uniforme del radio con el tiempo que se muestra en el gráfico no es necesariamente lo que sucedió en realidad. Las predicciones de la GUT nos permiten hablar de un período inflacionario a los 10^{-35} segundos, período en que la expansión fue mucho más rápida que la que se muestra en la figura anterior. De hecho, en la figura 52 se muestra el radio de curvatura en función del tiempo para el Universo inflacionario. Antes y después del período inflacionario el radio aumenta con suavidad. Sin embargo, durante la inflación el aumento es muy rápido. Como referencia, se muestra con una línea a trazos el radio correspondiente a .la expansión del Big Bang convencional.

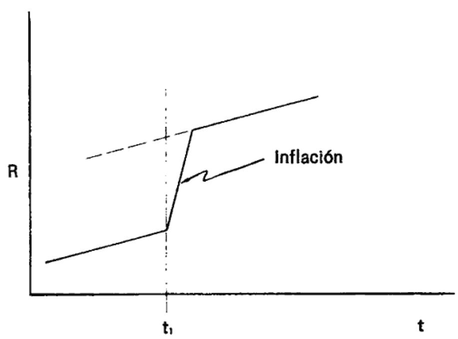


Fig. 52

Si observamos el tiempo t_1, vemos que el radio es mucho menor en el Universo inflacionario de lo que sería en la expansión normal. Esto significa que, si repetimos nuestro aná-

lisis con la velocidad de la luz para un universo que experimenta inflación, encontramos que antes del período inflacionario sí que es posible que todas las partes del Universo establezcan comunicación unas con otras. Por lo tanto, el Universo puede muy bien haber estado en equilibrio térmico antes de que empezara la inflación y las distancias se hicieran demasiado grandes.

La solución al problema del horizonte que surge del modelo inflacionario es, por tanto, bastante fácil de imaginar. En algún momento antes de la congelación GUT, cuando el Universo era muy pequeño, se estableció el equilibrio térmico. La parte del Universo que ahora está por encima del polo Norte estaba en contacto con la que ahora está por encima del polo Sur. Entonces, cuando el Universo tenía aproximadamente 10^{-35} segundos de edad, ocurrió la inflación. El Universo se expandió rápidamente, pero cada parte llevó consigo el recuerdo de una era anterior, una era en la que todo estaba a la misma temperatura. Observamos los resultados de este recuerdo cuando medimos el fondo de microondas. No encontramos ninguna sección del Universo cuya radiación difiera mucho de la asociada con cualquier otra parte. La radiación de microondas es típica de la que emite un cuerpo que se encuentra a la misma temperatura en todas partes, y la razón de ello es que en un momento determinado del pasado remoto el Universo estuvo en equilibrio térmico.

Quizás una analogía más mundana nos ayudaría a imaginar el papel de la inflación en el Universo primitivo. Supongamos que tenemos dos modelos de un perro, uno que aumenta de tamaño al mismo ritmo que lo hace un cachorro, y otro que es en realidad un globo que puede hincharse rápidamente. Si viéramos los dos modelos cuando han alcanzado su tamaño máximo, diríamos probablemente que ambos han tenido más o menos el mismo tamaño durante todo el período de crecimiento. La suposición sería razonable, pero sería falsa si el modelo del globo hubiera sido hinchado en algún momento del pasado. Para fijar las ideas, supongamos que ambos modelos tienen ahora el tamaño de un perro de seis meses y que la inflación ocurrió hace tres meses. Entonces el tamaño del

globo antes de los tres meses sería mucho más pequeño que el del modelo normal. Cualquier argumento basado en la esperanza de un crecimiento “normal” del modelo del globo en los tres primeros meses de su existencia sería erróneo, puesto que el tamaño del modelo durante ese periodo era mucho menor que el normal.

De la misma manera, el Universo inflacionario era mucho más pequeño de lo normal antes de transcurrir 10^{-35} segundos. En su estado pequeño, fue posible que las señales viajaran a todas sus partes y que se estableciera el equilibrio térmico. Luego ocurrió la inflación y el tamaño del Universo se volvió “normal”. El problema del horizonte surgió a causa de haber supuesto que podíamos extrapolar el tamaño del Universo en sentido retrógrado sin tener en cuenta el breve pero importante período inflacionario.

Podemos damos cuenta de la impresionante magnitud de los efectos de la inflación en el Universo si advertimos que las teorías más inflacionarias predicen que en algún momento alrededor de la congelación GUT el radio de curvatura del Universo aumentó desde unos 10^{-23} cm (10.000 millones de veces más pequeño que el tamaño de un protón) hasta unos 10 cm, el tamaño de un pomelo. Puesto que esto es una expansión del propio espacio y no un movimiento de la materia por el espacio, la inflación no viola las restricciones de la relatividad acerca del movimiento más rápido que la luz.

EL PROBLEMA DEL UNIVERSO PLANO

El problema del Universo plano no es un problema en el mismo sentido que los problemas de la antimateria, de la formación de las galaxias y del horizonte. Por el contrario, es una cuestión acerca de por qué el Universo está construido de una manera particular y no de otra. En concreto, el problema del Universo plano se refiere al hecho bastante extraordinario de que la cantidad de materia del Universo es cercana a la cantidad necesaria para detener la expansión universal a través de la acción de la atracción gravitatoria mutua.

No es una cuestión que deba ser resuelta para que sobreviva el modelo del Big Bang. No hay ninguna razón primordial para que el Universo deba de tener esta masa, pero tampoco la hay para que no la tenga. Por lo tanto, encontrar una solución a este problema es menos crucial para el desarrollo de la cosmología que resolver los otros. Sin embargo, el modelo inflacionario proporciona, como una especie de premio, alguna indicación de cómo se podría resolver el problema del Universo plano.

Vimos que el final del proceso inflacionario en el Universo primitivo fue su escapatoria del falso vacío por efecto túnel. Uno de los resultados de este hecho fue la conversión del exceso de energía del Universo en masa. Si consideramos seriamente esta idea, nuestras teorías tendrían que predecir entonces cuánta masa se creó en aquel momento.

Esta predicción se obtendría a partir del conocimiento de la forma de la curva de potencial, del nivel de energía del falso vacío y de la diferencia de energía entre el falso vacío y el estado final del Universo: la cantidad que llamamos ΔE en el capítulo 10. Si se conoce la cantidad de energía disponible para la conversión, es relativamente directo calcular la cantidad de materia que tendría que haber en nuestra era actual. Esta cantidad es un producto secundario de los mismos cálculos que se requieren para describir el propio proceso de inflación.

Aunque éste es un campo muy nuevo y cualquier resultado debe ser considerado con mucha cautela, los teóricos que han obtenido valores para la masa del Universo de esta manera, han hecho por regla general predicciones entre 0,01 y 10 veces la masa crítica necesaria para cerrar el Universo. Por lo tanto, parece, por el momento, que si se ajusta la barrera de potencial de forma que la congelación GUT tenga las propiedades correctas, se obtiene también la masa final del Universo. Es un bonito ejemplo de hallazgo por casualidad y además reduce la arbitrariedad de nuestra descripción del Universo.

XII. LA BÚSQUEDA DE LAS PARTÍCULAS FÓSILES

Todo el mundo en Nueva York está buscando algo.
Una que otra vez, alguien lo encuentra.

DONALD WESTLAKE
La danza del azteca

La historia temprana del Big Bang desde el punto de vista de la GUT tiene la mayoría de los atributos que esperamos encontrar en una gran teoría científica. Es bella, elegante y satisfactoria intelectualmente, y nos da una visión del funcionamiento de la naturaleza que ninguna teoría anterior había sido capaz de proporcionarnos. Sólo falta un ingrediente en la lista de atributos. Exigimos que toda teoría científica esté respaldada por un cuerpo de confirmaciones experimentales directas, y poco hay de esto en lo que hemos debatido en los últimos capítulos.

Esto no es demasiado sorprendente. Hemos visto que el período más crucial del Universo primitivo —el que determinó la mayor parte del curso posterior de su evolución— fue la congelación GUT, 10^{-35} segundos después del Big Bang. Las energías de colisión características de esa época eran tan altas que no hay posibilidad de producirlas en nuestros laboratorios, por lo menos en un futuro previsible. Por consiguiente, no podemos llevar a cabo pruebas directas en el laboratorio de los procesos que ocurrieron en aquella transición. La secuencia clásica de predicción, comprobación directa y confirmación a que están acostumbrados los físicos, no puede realizarse en este caso. Nos vemos reducidos, por tanto, a comprobar nuestras teorías sobre el Universo primitivo de una manera indirecta.

Ya hemos visto un buen ejemplo de prueba indirecta cuando discutimos el descubrimiento de la radiación de mi-

croondas cósmicas. En ese caso, vimos que la liberación de radiación que siguió a la formación de los átomos 500.000 años después del Big Bang se podía detectar hoy en la radiación de microondas que llega a la Tierra desde todas las direcciones. Una forma de imaginar la radiación es considerarla un eco del Big Bang, algo que fue creado hace mucho tiempo pero que no ha desaparecido y que aún podemos llegar a detectar. De la misma manera, podemos buscar vestigios del Universo primitivo para comprobar las teorías GUT. Hay una larga historia de búsquedas de dos de estos vestigios, aunque las búsquedas estaban motivadas por consideraciones más generales que las de comprobar ideas sobre el Universo primitivo. Los vestigios citados son los quarks y los monopolos magnéticos.

Se supone que los quarks desaparecieron del Universo cuando se congelaron en partículas elementales 1 milisegundo después del Big Bang. Sin embargo, cabría esperar que algunos quarks no estuvieran cerca de los compañeros adecuados y perdieran la oportunidad de combinarse. Estos quarks estarían aún presentes en el Universo y, si fueran suficientemente abundantes, sería posible detectarlos en nuestros laboratorios. Un resultado positivo en la búsqueda de quarks prestaría apoyo a la idea de la naturaleza compuesta de las partículas elementales y reforzaría así nuestra fe en la cromodinámica cuántica. Puesto que esta teoría es un elemento importante de la gran unificación, el descubrimiento de un quark libre nos proporcionaría cierta evidencia experimental, aunque indirecta, de que nuestra imagen del Universo primitivo como una serie de congelaciones sucesivas es correcta.

El negativo de esta proposición, sin embargo, no es necesariamente cierto. En el capítulo 7 vimos que la GUT predice que, en nuestra era presente, los quarks deberían estar confinados dentro de partículas elementales. Por lo tanto, el fracaso en la búsqueda de quarks libres no significaría tener que dudar de ninguna teoría actual. Para explicar este resultado sólo sería necesario argumentar que el número de partículas fósiles resultantes del proceso de combinación en el primer milisegundo es demasiado escaso para que se detecte en un

experimento dado. No hay ninguna indicación teórica sobre el número de quarks fósiles que debería haber, por lo que siempre queda esta escapatoria.

La situación es ligeramente distinta en lo que se refiere a los monopolos magnéticos. Tal como hemos visto, se supone que la congelación GUT produjo estas partículas a través del mismo tipo de proceso que produjo las cuerdas. El número de monopolos que se crearon y su comportamiento posterior son objeto en la actualidad de un intenso debate entre los teóricos. No obstante, la detección de una partícula con una carga magnética aislada (el equivalente de un polo norte o sur de un imán), con una masa característica de la masa de unificación (10^{16} G*e*V o más), sería sin lugar a dudas una fuerte evidencia de que algo como la congelación GUT ocurrió realmente más o menos de la manera que hemos descrito.

Como en el caso de los quarks fósiles, el fracaso en la búsqueda de monopolos no refutaría necesariamente el modelo de la gran unificación del Universo primitivo. Para los monopolos, sin embargo, un fracaso continuado en su búsqueda requeriría una explicación teórica convincente. Se supone que estas partículas existen y si no se encuentran, debería haber una buena razón para ello.

Una de las coincidencias más interesantes en la búsqueda de partículas fósiles es que los mejores candidatos al descubrimiento de los quarks y los monopolos magnéticos son producto del mismo laboratorio (aunque fueron realizados por investigadores distintos). El Low Temperature Laboratory de la Stanford University está bajo la dirección de William Fairbank, un hombre que ha dedicado un gran esfuerzo a la búsqueda de los quarks desde finales de los años sesenta. Un joven investigador de su laboratorio, Blas Cabrera, asombró al mundo científico, en 1982, cuando anunció el registro de un suceso que podría ser muy bien la primera detección de un monopolo magnético. Tanto el quark de Fairbank como el monopolo de Cabrera han sido objeto de un intenso debate en la comunidad científica y es justo decir que ninguno de los dos ha sido todavía aceptado sin objeciones. Por otra parte, ninguno ha sido definitivamente rechazado. A continuación

discutiremos el estado actual de la búsqueda de ambos tipos de partículas fósiles.

MONOPOLOS MAGNÉTICOS

Durante la congelación GUT, y a medida que ésta avanzaba, se formaron defectos en el Universo. (Estos defectos se discutieron con detalle en el capítulo 9.) Los defectos de punto se han descrito como microscópicos "giros del espacio", lugares donde cambia bruscamente la dirección de la simetría. Serían análogos al defecto en un campo magnético del tipo mostrado a la izquierda de la figura 53, un punto donde el campo magnético cambia de manera discontinua en cualquier línea radial.

Los defectos de punto en el Universo primitivo pueden examinarse teóricamente. Por ejemplo, si trazamos una superficie imaginaria alrededor de un defecto, tal como se muestra a la derecha de la figura 53, podemos preguntamos lo que predice la teoría acerca del campo magnético en los puntos de dicha superficie. Resulta que si la superficie está lo suficiente lejos del defecto, el campo magnético apunta radialmente hacia fuera. Además, el campo tiene exactamente la intensidad que tendría si un polo magnético aislado estuviera situado en la posición del defecto. A partir de estos cálculos, los teóricos concluyen que los defectos formados durante la congelación GUT se nos aparecerían como partículas que producen los mismos efectos que un polo magnético aislado. La existencia de estas partículas se postuló hace casi un siglo, y se denominan monopolos magnéticos.

Hay un par de puntos de esta discusión que seguramente necesitan elaborarse más. ¿Cuál es, por ejemplo, la conexión entre algo llamado defecto y una partícula elemental? Una buena analogía de lo que los físicos piensan de esta cuestión es imaginar una larga cola de coches en un embotellamiento de tráfico. Si el primer coche adelanta unos cuantos metros, el coche siguiente adelantará para llenar el espacio, luego lo hará el tercero para llenar el espacio dejado por el segundo y

así sucesivamente. Podríamos describir este proceso tal como acabamos de hacerlo, totalmente en términos de los movimientos de los coches de la cola. Sin embargo, sería igualmente correcto describir la situación en términos del movimiento del hueco. Podríamos decir, por ejemplo, que ha aparecido un hueco en la cola y se ha movido hacia atrás a una velocidad de tantos metros por segundo. El hueco es en realidad un defecto en la cola de coches, pero para todos los efectos puede considerarse como una entidad con existencia propia. De modo similar el defecto de punto producido durante la congelación GUT tendría el aspecto de una partícula, con propiedades poco habituales, por supuesto, pero, sin embargo, una partícula.

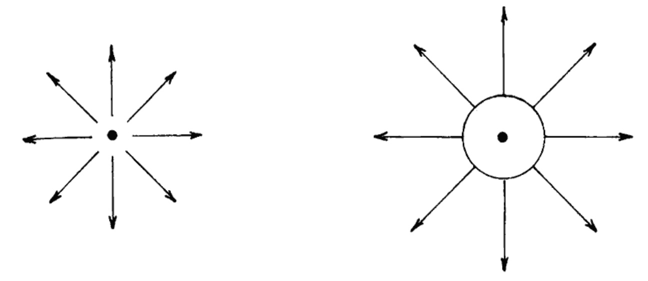


Fig. 53

El segundo punto que necesita una clarificación tiene que ver con la intensidad del campo magnético producido por un monopolo magnético. Preguntar por este campo es equivalente a preguntar con qué fuerza un monopolo magnético atrae o repele a otro. A primera vista podría parecer que la intensidad de la interacción electromagnética, igual que la de la carga eléctrica, debería ser una de esas cantidades de la naturaleza que podemos medir pero que no podemos calcular. Sin embargo, en 1931, el premio Nobel británico P. A. M. Dirac mostró que éste no era el caso. Utilizando argumentos basados en los principios generales de la mecánica cuántica, mostró que si se añadía la interacción entre monopolos magnéticos a la tabla de fuerzas fundamentales dada en la página 88, su intensidad sería como mínimo sesenta veces la de la inter-

acción fuerte. En otras palabras, representaría la fuerza más potente de la naturaleza.

En razón del descubrimiento de Dirac se ha supuesto siempre que si un monopolo magnético pasara a través de un aparato experimental, dejaría tras él una evidencia inconfundible de su presencia. La fuerza electromagnética asociada con el monopolo en movimiento actuaría sobre los electrones de los átomos y los arrancaría de sus núcleos. El resultado sería un rastro de átomos desgajados que resultaría bastante fácil de detectar. Puesto que los átomos que han sido despojados de sus electrones se llaman iones, el proceso por el que un monopolo podría arrancar los electrones de los átomos se llama ionización.

Hasta hace unos años, todas las búsquedas de monopolos magnéticos dependían de una manera u otra de la idea de que deberían ionizar fuertemente la materia. Los experimentos se planeaban para detectar directamente los restos que se esperaba que el monopolo dejaría en su camino, o bien se suponía que un monopolo al alcanzar la Tierra perdería energía tan rápidamente a través del proceso de ionización que se frenaría hasta detenerse. En este último caso, el monopolo sería como una piedra lanzada en una jarra de melaza: no iría nunca muy lejos del punto donde hubiera alcanzado la Tierra. La lógica de los experimentos diseñados para aprovechar este comportamiento era buscar en áreas donde podía esperarse que se congregaran los monopolos, por ejemplo, cerca de los polos magnéticos o en rocas lunares. Todas las búsquedas, tanto directas como geológicas, han sido infructuosas.

El desarrollo de la GUT ha proporcionado una explicación a este desconcertante fracaso. Hasta hace poco los físicos creían que los monopolos magnéticos deberían tener una masa de unos pocos G*e*V. No había ninguna justificación seria para esta creencia, pero no había ninguna partícula conocida con una masa superior a ésta, y simplemente no se le había ocurrido a nadie que un monopolo fuera radicalmente distinto de otras partículas. Una partícula con una carga magnética sería acelerada por un campo magnético, igual que las partículas con carga eléctrica son aceleradas por los campos

eléctricos. Hay un pequeño campo magnético que se extiende por toda la Galaxia. Sus orígenes no se comprenden muy bien, pero sus efectos pueden medirse con facilidad. El campo galáctico es pequeño —una millonésima de la intensidad del campo terrestre— pero se extiende por distancias inmensas. Un monopolo magnético con una masa de sólo unos cuantos G*e*V sería acelerado rápidamente por el campo galáctico y se acercaría a la Tierra a casi la velocidad de la luz. Un monopolo que se moviera a esa velocidad provocaría sin duda una gran cantidad de ionización. El fracaso de las búsquedas experimentales hizo que muchos investigadores (incluido el autor) concluyeran que había muy pocos monopolos en el Universo y tal vez ninguno. El porqué de esto seguía siendo un misterio, pero parecía un hecho firmemente establecido.

Los monopolos GUT, con su masa enorme, cambiaron por completo esta situación. El campo galáctico aceleraría también un monopolo pesado, pero no podría impartirle una velocidad muy elevada. Puede esperarse que los monopolos GUT se acerquen a la Tierra a un 0,1% de la velocidad de la luz o menos, a paso de tortuga comparado con otros rayos cósmicos. A esta velocidad, los monopolos no causarían muchos destrozos en los átomos, sobre todo porque al pasar tan lentamente los átomos tienen tiempo de adaptarse a las fuerzas que se ejercen sobre ellos. De la misma manera, una bala atraviesa una puerta, pero si ésta se empuja con la mano, se abre lentamente sin resultar dañada. En otras palabras, todas las búsquedas de monopolos basadas en la idea de que los monopolos causan una gran cantidad de ionización no detectarían en absoluto monopolos GUT. Esto significaba volver a empezar de nuevo.

El cambio en el enfoque de las búsquedas de monopolos tuvo lugar en un tiempo notablemente corto. Quizás una experiencia personal refleje bien este punto. Escribí un artículo en el que exponía que los monopolos masivos se moverían despacio e ionizarían muy poco, y lo envié a una prestigiosa revista americana de física, donde fue rechazado en razón de que se había "demostrado" que los monopolos producían mucha ionización. Después de unos cambios secundarios,

mandé el artículo a otra revista. Por aquel entonces las ideas sobre los monopolos habían cambiado tanto que fue aceptado sin ningún comentario. Cuando apareció publicado, cuatro meses más tarde, ya era agua pasada. Para entonces, todo el mundo sabía que los monopolos masivos no podían haberse detectado en las búsquedas anteriores de monopolos. Un paradigma científico había experimentado un cambio importante en un período de menos de seis meses.

Pero, si no podemos detectar los monopolos mediante la observación de los efectos de sus interacciones con los átomos, ¿cómo podemos hacerlo? Resulta que existe otra importante propiedad que cualquier polo magnético posee. Si una espira de alambre se dispone de forma que la trayectoria del monopolo la atraviese, el paso del monopolo provocará el flujo de una corriente eléctrica por la espira. Si la espira está hecha de cobre ordinario, las colisiones entre los átomos de cobre y los electrones en movimiento que constituyen la corriente hacen que finalmente la corriente cese. Sin embargo, si la espira está hecha de un tipo especial de material llamado superconductor, la corriente no desaparecerá y seguirá fluyendo indefinidamente. El flujo de corriente en la espira es entonces un registro permanente del paso de un monopolo magnético.

El problema con este esquema de detección es que los materiales deben mantenerse a muy baja temperatura para que sean superconductores. En un experimento típico, baja significa entre 1 y 10° por encima del cero absoluto (es decir, entre –263 y –272° Celsius). Esto significa que la búsqueda de monopolos mediante la medida de su efecto en una espira de alambre requiere unas técnicas muy especiales, las asociadas con el campo que llamamos física de las bajas temperaturas. Esto explica, por lo menos en parte, por qué el suceso que es el candidato más probable para el descubrimiento de un monopolo no se realizó en un laboratorio dedicado al estudio de la física de las altas energías.

Blas Cabrera había diseñado un experimento para medir una de las constantes fundamentales de la física, un propósito que podía conseguirse mejor si se trabajaba a bajas tempera-

turas. Una parte del aparato para este experimento consistía en una espira de metal superconductor que medía unos cuantos centímetros de diámetro. Se dio cuenta de que si registraba la corriente en esta espira cuando el resto del experimento no estaba en funcionamiento, la espira actuaría como un detector de monopolos. Por lo tanto, aunque el experimento no se había diseñado específicamente para detectar monopolos, se podía llevar a cabo su búsqueda como tarea adicional. La espira permanecería simplemente en el aparato y si sucedía que un monopolo la atravesaba, el suceso quedaría registrado.

La búsqueda de monopolos funcionó durante seis meses en el otoño y el invierno de 1981-82 sin ninguna indicación clara de éxito. Entonces, a la 1 h 45 min de la tarde del día de san Valentín de 1982, sin que hubiera nadie en el laboratorio, sucedió. La corriente a través de la espira aumentó de golpe justo la cantidad que aumentaría si un monopolo pasase a través de ella. La corriente en la espira, tal como se registró en un rollo de papel de gráficos, tenía el aspecto que se muestra a la izquierda de la figura 54. El salto súbito de la corriente es exactamente lo que se esperaría del paso de un monopolo. El cambio de corriente, que es proporcional a la altura del salto, también coincide con exactitud.

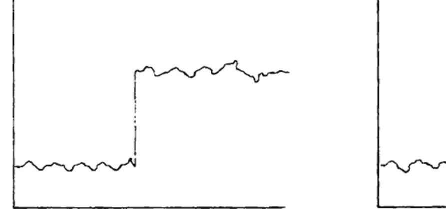
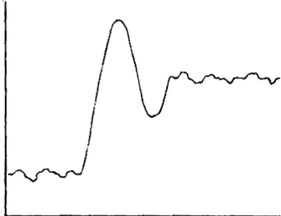



Fig. 54

A pesar de esta evidencia aparentemente convincente, la primera reacción de Cabrera fue preguntarse: «¿Qué es lo que ha funcionado mal?» Por su experiencia en el laboratorio, sabía que en cualquier sistema aparecen con frecuencia sucesos inesperados, por lo que debe tenerse cierta precaución al interpretar un hecho aislado como éste. Cabrera dio vueltas a la idea de que quizás alguien había entrado en el laboratorio

para tomar prestado algún equipo y había golpeado el aparato. «Después de todo», decía, «esta persona debe estar ahora demasiado turbada para decírnoslo». Para comprobar esta fuente posible del suceso, Cabrera registró la corriente de la espira mientras golpeaba el delicado aparato con un destornillador. La señal producida por este tipo de golpes se muestra a la derecha de la figura 54, y difiere claramente de la señal del día de san Valentín. Mediante un proceso de eliminación a base de muchas pruebas. Cabrera pudo descartar la mayoría de las explicaciones alternativas y dejar como interpretación más probable del suceso el paso de un monopolo magnético.

A partir del hecho de que vio la señal de un monopolo en su pequeña espira después de 185 días, Cabrera llegó a la conclusión de que debe haber unos seis monopolos que atraviesan cada metro cuadrado de la superficie de la Tierra cada día. Esto significaría que entre cinco y diez atraviesan nuestro cuerpo cada día. (¡Es una suerte que se muevan lentamente y no puedan causar mucho daño!)

El anuncio de este suceso produjo una gran excitación entre los físicos y en la actualidad están en construcción muchos experimentos avanzados de detección de monopolos. Cuando Cabrera hizo su descubrimiento, tenía un sistema mejorado en las mesas de dibujo, que entró en funcionamiento en otoño de 1982. En la primavera de 1983 aún no había observado un segundo monopolo, lo que significa que debe reducirse el número estimado de monopolos del Universo por un factor 10 como mínimo, es decir, en lugar de 6 por metro cuadrado y por día, no pueden ser más de 0,6.

Si los monopolos son, en realidad, poco abundantes, este tipo de resultado no es demasiado sorprendente. Se puede tener suerte y ver uno al poco tiempo de empezar la búsqueda y luego no encontrar ninguno más durante años. Cuanto más se tiene que esperar para que se produzca el segundo suceso, menos abundantes son los monopolos. Cualquiera que tenga la afición de buscar objetos relativamente escasos (los coleccionistas de libros, p. ej.) está familiarizado con este hecho. Sin embargo, el resultado experimental es tan claro y el análisis de Cabrera es tan riguroso que la mayoría de físicos cree

que hay una gran probabilidad de que este suceso fuera la primera vez que se ha observado un monopolo magnético.

Si esta interpretación es la correcta, sería muy importante para nuestras ideas sobre el Universo primitivo. El monopolo sería un visitante que ha llegado hasta nosotros directamente de la congelación GUT y, mediante el estudio de sus propiedades y de su abundancia, podemos refinar nuestro conocimiento de aquel acontecimiento.

Sin embargo, hay algunas dificultades con esta interpretación del resultado de Cabrera que no tienen nada que ver con su experimento. Suponemos que los monopolos, al haber sido creados en las primeras etapas del Big Bang, deben ser parecidos a la radiación de microondas en el sentido de abundar por un igual en cualquier lugar del Universo. Si cabe esperar que un monopolo atraviese un metro cuadrado de la superficie terrestre cada tres días (o cada diez días, o cada mes), entonces tenemos que llegar a la conclusión, basándonos en este argumento, que también deben atravesar un metro cuadrado en cualquier lugar de la Galaxia al mismo ritmo. En otras palabras, nuestra primera impresión es que podemos extrapolar simplemente el flujo de monopolos encontrado en la superficie terrestre a lugares alejados de nosotros.

Si suponemos que los monopolos son tan abundantes en nuestra galaxia como parece indicar el suceso de Cabrera, surgen algunos problemas teóricos. Uno de ellos tiene que ver con la existencia del campo magnético galáctico al que hemos aludido anteriormente. Los monopolos serían acelerados por este campo, por lo que se transferiría energía del campo magnético a la energía de movimiento de los monopolos. El efecto de esta transferencia sería la disminución de la intensidad del campo. Si no se reemplaza la energía tomada del campo y si los monopolos son tan abundantes como parece indicar el experimento, entonces se extraería toda la energía del campo galáctico en un tiempo corto, tal vez un millón de años o menos. Además, nuestras mejores ideas teóricas sobre el origen del campo magnético galáctico indican que sería imposible en principio establecer el campo si hubiera una cierta abundancia de monopolos magnéticos. La extracción de ener-

gía del campo sería demasiado importante; sería' como tratar de mover un coche con los frenos puestos. El hecho de que en la Galaxia haya un campo magnético que se supone permanente indica que el número de monopolos que atraviesa un metro cuadrado en la superficie terrestre cada día tendría que ser menor de 0,01 (es decir, que no tendría que haber más de 1 cada cien días). Éste es un factor 600 mayor que el número obtenido a partir del descubrimiento original de Cabrera, pero sólo un factor 60 mayor que el límite propuesto por Cabrera en el momento de escribir esto. El límite en el número de monopolos derivado del campo magnético galáctico se conoce como límite de Parker, en honor al astrofísico de la University of Chicago. Eugene Parker, que fue quien primero lo descubrió.

A partir de algunos cálculos recientes de la propia teoría GUT se puede obtener otro límite en el número de monopolos. Dado que es posible comprender las propiedades de los monopolos usando la GUT, podemos predecir lo que les sucede al entrar en contacto con grandes cantidades de materia.

Resulta que los monopolos GUT pueden tener la capacidad de catalizar la desintegración de los protones, es decir, los protones situados en las proximidades de uno de estos monopolos pueden tener una probabilidad mayor de desintegración que los que no lo están. Para que este proceso tenga un efecto a gran escala, los monopolos tienen que tener un encuentro cercano con un gran número de protones (o neutrones), lo que significa que la catálisis será más importante en sistemas muy densos.

En la Galaxia, hay muchos sistemas en los que la materia existe en estados de muy alta densidad. Una estrella de neutrones, por ejemplo, puede tener un tamaño de sólo unos 20 kilómetros de diámetro, y tener, sin embargo, la misma masa que el Sol. Un monopolo que se mueva a través de una estrella de neutrones tendrá muchos encuentros cercanos y, por consiguiente, puede esperarse que provoque muchas desintegraciones de los neutrones. Si hubiera tantos monopolos en la Galaxia como indican los resultados de Cabrera y si estos monopolos catalizan realmente la desintegración, cabría espe-

rar entonces que la energía adicional añadida a las estrellas de neutrones por las desintegraciones inducidas provocaría que esas estrellas emitieran grandes cantidades de rayos X. Por los resultados obtenidos con los telescopios de rayos X instalados en satélites, sabemos que éste no es el caso. Aunque hay un debate teórico muy importante sobre los detalles de estos cálculos, existe un consenso general en el sentido de que las propiedades observadas de las estrellas de neutrones son incongruentes con los resultados de Cabrera, tal vez en un factor de un billón o más. En otras palabras, algunos teóricos aseguran que el número real de monopolos de las galaxias tiene que ser un billón de veces inferior a la estimación de Cabrera.

Esta conclusión no es aceptada universalmente. Aunque se admite que los monopolos que entran en contacto muy estrecho con los protones catalizan su desintegración, otra escuela de teóricos argumenta que las intensas fuerzas electromagnéticas asociadas con el acercamiento de un monopolo empujarán los protones fuera de su trayectoria antes de que el proceso catalizador pueda actuar. Los cálculos que hay que realizar para resolver este punto son inmensamente complicados y puede transcurrir algún tiempo antes de que se lleven a cabo. La posible catálisis de la desintegración del protón por los monopolos es probable que sea un tema de debate durante algún tiempo.

A partir de estos argumentos teóricos, llegamos a la conclusión de que el debate sobre el suceso de Cabrera debe tener una de las explicaciones siguientes:

1. El experimento es erróneo (poco probable), o Cabrera tuvo una suerte extraordinaria al observar el paso muy poco frecuente de un monopolo. En este caso no se detectarán más monopolos durante mucho tiempo.
2. Los teóricos han pasado por alto efectos que podrían debilitar o invalidar sus conclusiones (ya ha sucedido antes en situaciones similares).
3. Los monopolos no están distribuidos por la Galaxia de manera uniforme.

Esta última alternativa ha sido propuesta insistentemente por Sheldon Glashow, uno de los fundadores de la teoría de la unificación. Glashow argumenta que los monopolos, en razón de su masa, deben interaccionar con otra materia a través de la fuerza gravitatoria y por lo tanto tenderán a estar concentrados en regiones de alta densidad de materia. En este caso quedaría todo solucionado: la densidad de monopolos en la región de la Tierra podría ser suficientemente alta para medirla, mientras que, a) mismo tiempo, habría muy pocos monopolos en el espacio interestelar para destruir el campo magnético galáctico y las estrellas de neutrones.

LA BÚSQUEDA DE QUARKS FÓSILES

La búsqueda de quarks no se ha realizado a lo largo de tanto tiempo como la búsqueda de monopolos, pero ha sido mucho más intensa (por lo menos hasta hace poco). El resultado de la búsqueda puede resumirse en una frase. Con una única excepción, las búsquedas directas y geológicas de quarks no han producido ningún resultado positivo.

Hasta el desarrollo de la teoría del confinamiento de los quarks (véase el capítulo 7), este hecho era causa de problemas conceptuales muy graves. ¿Cómo era posible que los quarks fueran los bloques fundamentales constitutivos de la materia y que no se hubieran observado aún en el laboratorio? Sería como hablar de protones y neutrones sin haber visto ninguno aislado. Sin embargo, la teoría del confinamiento predice que en nuestra fría era actual no podemos esperar ver quarks aislados excepto en combinaciones sin color. Este resultado ha eliminado parte de la urgencia en la búsqueda de los quarks, aunque sigue siendo razonable hablar de encontrar quarks fósiles que, por alguna razón, quedaron excluidos de la congelación de los quarks.

William Fairbank ha trabajado largo tiempo en la búsqueda de quarks y su aparato, situado en el mismo edificio que el de Cabrera, ha producido el único candidato superviviente de la detección real de un quark. La figura 55 es un esquema

simplificado del aparato de Stanford para la búsqueda de quarks. La lógica del experimento es fácil de describir, aunque desde el punto de vista técnico es bastante difícil de llevar a cabo.

En primer lugar, se sitúa una esfera de niobio de 0,25 mm de diámetro —más o menos el tamaño de una mota de polvo— en el campo magnético establecido entre dos placas de vidrio. A temperaturas cercanas al cero absoluto las fuerzas magnéticas que se ejercen sobre la esfera la empujan hacia arriba, en un proceso parecido al que hace que un imán levanta un clavo. Si el campo se ajusta de manera correcta, puede hacerse que la fuerza magnética hacia arriba anule exactamente la fuerza de gravedad hacia abajo y la bola flote en el espacio por acción de los imanes.

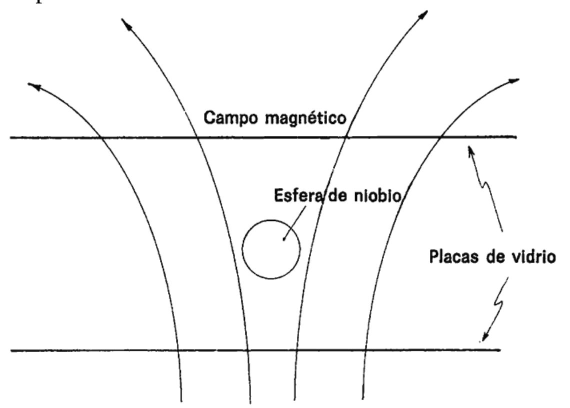


Fig. 55

Una vez conseguido este equilibrio, es posible medir la carga total de la esfera si se aplica un voltaje a las placas de vidrio y se observa el movimiento de respuesta de aquélla. En la práctica, el grupo de Stanford no mide la carga de manera directa, sino que trata de reducirla a cero. Por ejemplo, si existe una carga positiva en la esfera (tal vez algunos electrones se han desprendido al manipularla), se la “rocía” con carga negativa para anularla. Si la esfera presenta una carga inicial negativa se sigue un procedimiento similar. El resulta-

do final es que la carga de la esfera es tan cercana a cero como es posible lograr.

Si en la esfera sólo hay protones y electrones ordinarios, este procedimiento producirá finalmente una esfera con una carga total cero. En este caso, la esfera no responderá en absoluto al voltaje de las placas de vidrio. Sin embargo, si en algún punto de la esfera hay una partícula con una carga fraccionaria, será imposible conseguir una carga neta nula añadiendo unidades enteras de carga eléctrica positiva o negativa. La carga total será siempre de ±1/3 o de ±2/3. Una esfera que se comporte de esta manera se dice que contiene un quark.

Hay una analogía muy útil de este experimento. Supongamos una cuenta bancada en la que sólo se pueda ingresar o retirar dinero en cantidades enteras de dólares. Si tenemos un saldo positivo, podemos empezar a retirar dólares para reducirlo. Si el saldo resulta cero en algún momento, sabremos que habíamos empezado con una cantidad entera de dólares en la cuenta. Pero si llegamos a una situación en la que al retirar un dólar el saldo resulta negativo y al ingresarlo de nuevo vuelve a ser positivo, este hecho, se puede utilizar como evidencia de la existencia de una fracción de dólar (p. ej., un cuarto de dólar).

Fairbank realizó la primera versión de este experimento en 1969 y encontró una esfera de niobio con una carga de –0,32, casi exactamente una tercera parte de la carga del electrón. Esto es, por supuesto, lo que cabría esperar si hubiera un quark ligado al niobio de alguna manera. Sin embargo, existían tantas posibilidades de error en el experimento que decidió no publicar este resultado. En cambio, dedicó buena parte de la década siguiente a reconstruir y mejorar su aparato. A mediados de los años setenta inició los nuevos experimentos mejorados y encontró que en un determinado número de esferas de niobio quedaban cargas fraccionarias de un tercio y dos tercios, resultado que anunció en 1977. Desde entonces el número de objetos con carga fraccionaria que se han medido en el Stanford Laboratory ha aumentado a más de una docena. A pesar de los años de debate y escrutinio intenso de la técni-

ca experimental, este resultado se ha mantenido de manera obstinada.

Al mismo tiempo, nadie más ha tenido éxito en la búsqueda de los quarks, a pesar de que varios grupos en todo el mundo han trabajado duro para conseguirlo. Esto deja la situación del quark fósil en el limbo. El experimento está demasiado bien hecho y analizado con demasiado rigor para ser ignorado, pero la falta de una confirmación independiente significa también que no puede aceptarse sin objeciones.

SUMARIO

El estado de la búsqueda de partículas fósiles creadas en las primeras etapas del Big Bang es algo ambiguo. Según algunas versiones de la GUT, se habrían creado monopolos magnéticos en cantidades copiosas 10^{-35} segundos después de la creación y deberían ser aún evidentes a nuestro alrededor. Hay un buen candidato a la detección de un monopolo, pero algunas consideraciones teóricas sugieren que en nuestra galaxia pueden ser menos abundantes de lo que podría indicar este experimento. Hasta que no se observe otro monopolo, no hay manera de hacer una interpretación absolutamente firme del suceso de Cabrera.

La búsqueda de quarks presenta el mismo aspecto experimental. No se puede rechazar la evidencia de que existen partículas con carga fraccionaria pero aun así tiene que ser reproducida independientemente. Esta búsqueda es menos crucial en lo que se refiere a las teorías sobre el Universo primitivo, ya que siempre es posible ajustar estas teorías de modo que la presencia de quarks fósiles sea tan pequeña que resulte imposible de detectar. Sin embargo, un resultado positivo de la búsqueda nos haría sentir más seguros de que nuestro concepto de las partículas elementales como estructuras compuestas es correcto.

XIII. MAS ALLA DEL TIEMPO DE PLANCK: PLANTEANDO LAS PREGUNTAS FINALES

La respuesta a la vida, al Universo, a todo...
es 42.

DOUG ADAMS
Guía Hitchhiker de la Galaxia

EL PROBLEMA

Cuando se desarrolle una versión final de la GUT, podremos investigar el Universo hasta el tiempo de Planck, a 10^{-43} segundos del Big Bang. El significado de este tiempo fue reconocido por vez primera por Max Planck, el físico alemán que fue uno de los fundadores de la mecánica cuántica. En 10^{-43} segundos, la luz puede viajar 3×10^{-32} cm, menos de una mil billonésima parte del tamaño de un protón. La mecánica cuántica indica que una partícula que tenga que sondear distancias tan cortas tiene que tener una energía muy grande, una energía comparable con la energía gravitatoria de dos partículas separadas por 3×10^{-32} cm. Esto nos lleva a la conclusión de que para esta escala de tiempo y distancia, no podemos despreciar los efectos de la mecánica cuántica sobre la fuerza de gravedad. Si queremos ir más allá del tiempo de Planck, tendremos que disponer de una teoría cuántica de la gravedad. Por el momento no existe esta teoría, pero se está llevando a cabo un intenso esfuerzo teórico para encontrar una.

Si se desarrollara dicha teoría, podríamos extender nuestro conocimiento de la historia del Universo más allá del tiempo de Planck hasta el momento mismo de la creación. El intervalo de los primeros 10^{-43} segundos podría ser muy interesante, con procesos físicos nunca vistos en el Universo desde entonces. Podría ser también bastante aburrido, poca cosa más que

la extrapolación de lo que ya conocemos. No lo sabremos hasta que se desarrolle la teoría.

Una vez tengamos una teoría cuántica de la gravedad, surge una segunda cuestión. ¿Podemos crear una teoría de la naturaleza realmente unificada, una teoría que incluya la gravedad con las otras fuerzas fundamentales? Un problema que surge en el desarrollo de esta teoría se refiere a la enorme diferencia que existe entre los marcos conceptuales de la relatividad general y de la mecánica cuántica. En la relatividad general, la gravedad aparece a través de un proceso que es esencialmente geométrico, mientras que la gran unificación exige que consideremos que todas las fuerzas son generadas por el intercambio de partículas. Podemos discutir el problema clásico de la órbita de la Luna desde estos dos puntos de vista para ilustrar esta diferencia.

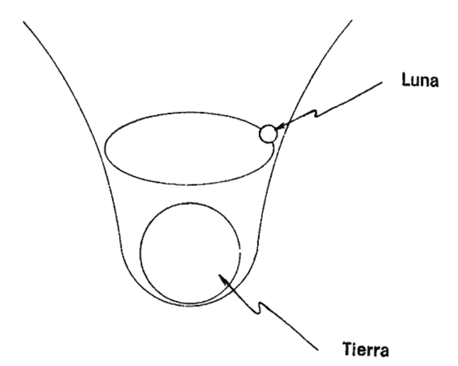


Fig. 56

Si utilizáramos los conceptos de la relatividad general, al analizar la situación diríamos que la Luna gira alrededor de la Tierra a causa de los efectos que tiene la masa terrestre sobre el espacio. Una manera fácil de representar este efecto es imaginar el espacio vacío como una lámina plana de caucho elástico cuadriculada. La presencia de la Tierra corresponde a la presencia de un gran peso sobre la lámina. En la región del peso la lámina experimenta un empuje hacia abajo y forma una depresión, tal como se muestra en la figura 56. Decimos que la presencia del peso curva la superficie de la lámina. Si

representamos la Luna con una canica rodando sobre la lámina, puede considerarse que el movimiento de la Luna en su órbita es similar al rodar de la canica por los lados de la depresión creada por la Tierra.

El punto clave de la discusión es que en este modelo no aparece en ninguna parte el concepto de fuerza o de interacción. El movimiento de la Luna se explica por completo en términos geométricos. La presencia de la masa de la Tierra altera la geometría del espacio y lo que era una llanura plana se convierte en un valle. La órbita de la Luna se describe entonces en términos del movimiento de otra masa en esta depresión. Esta analogía capta el espíritu de la relatividad general, aunque los cálculos haya que hacerlos, en realidad, en un espacio-tiempo de cuatro dimensiones en lugar de una lámina de goma elástica de dos dimensiones.

Sin embargo, si tuviéramos que enfocar el problema de la órbita de la Luna desde el punto de vista de las partículas elementales, tendríamos que indagar acerca de las partículas cuyo intercambio genera la fuerza entre la Tierra y la Luna. Hay un precedente de esta cuestión en nuestra discusión sobre la electricidad y el magnetismo en el capítulo 5, donde vimos que la fuerza eléctrica entre dos partículas cargadas estaba producida por el intercambio de una partícula sin masa de spin 1 llamada fotón. Sabemos que una característica de la fuerza eléctrica es que las cargas iguales se repelen entre sí, mientras que las cargas distintas se atraen. Resulta que este comportamiento es una regla general para las fuerzas asociadas con el intercambio de partículas de spin 1: las partículas iguales tienen que repelerse.

En el caso de la gravedad, sin embargo, el comportamiento es distinto. Aquí cualquier objeto masivo atrae a cualquier otro objeto masivo: las partículas se atraen entre sí, las antipartículas se atraen entre sí y las partículas atraen a las antipartículas. No existe una fuerza gravitatoria repulsiva, no hay "antigravedad". Puede demostrarse que esta atracción universal sólo puede surgir del intercambio de partículas de spin 0 o de spin 2, pero no del intercambio de spin 1. Esto significa que cualquier teoría cuántica de la gravedad que desarrolle-

mos tendrá que implicar partículas diferentes de los fotones, gluones y bosones vectoriales que hemos encontrado hasta ahora. De hecho, resulta que la teoría de la gravedad de Einstein sólo puede ser reproducida por una teoría que suponga el intercambio de una partícula de spin 2, sin implicar ninguna partícula de spin 0. Puesto que la relatividad general ha salido airosa de todas las pruebas experimentales a que ha sido sometida, daremos por sentado que cualquier teoría cuántica de la gravedad supondrá el intercambio de una partícula sin masa de spin 2. En el capítulo 5 incluimos esta partícula, llamada gravitón, en nuestra lista de partículas intercambiadas cuando discutimos las fuerzas fundamentales.

Si aplicamos este tipo de ideas al problema de la Tierra y la Luna, nuestra noción de cómo la Luna se mantiene en su órbita cambia drásticamente con respecto a la asociada con la teoría de Einstein. La fuerza entre la Tierra y la Luna está generada por un flujo de gravitones virtuales que se intercambian entre ambos cuerpos. Esta fuerza es por completo de naturaleza dinámica y no tiene nada que ver en absoluto con la geometría. Tiene, sin embargo, una gran semejanza con las demás fuerzas fundamentales, por lo menos en que está generada por el intercambio de una partícula.

El desarrollo de una teoría de la gravedad basada en el intercambio de gravitones y la unificación de esta teoría con la GUT es la tarea que ha emprendido esta generación de físicos teóricos. Queda por ver cuál será la forma final de la teoría cuando alcancen su objetivo (si es que llegan a ello), pero hay algunas características generales que cabe esperar que tenga. Estas características generales, a su vez, nos dan cierta idea de lo que podemos esperar cuando nos movamos más allá del tiempo de Planck.

SUPERSIMETRÍA, SUPERGRAVEDAD Y SUPERUNIFICACIÓN

En realidad, la tarea que tenemos entre manos consta de dos partes. Una es desarrollar una teoría cuántica de la grave-

dad basada en el intercambio de partículas; la otra es incorporar esta teoría en la gran unificación. La situación es similar a la que encontramos al hablar de la unificación de la fuerza fuerte y la electrodébil. Primero fue preciso tener una teoría de las interacciones fuertes (la cromodinámica cuántica) y luego fue necesario encontrar una manera de unificar esa teoría con la de Weinberg-Salam para llegar a la GUT. La técnica que ahora exploramos se llama supersimetría, mientras que las teorías cuánticas de gravedad que utilizan la supersimetría se llaman teorías de la supergravedad.

Aunque existen dificultades conceptuales para conseguir una unificación de la gravedad con las demás fuerzas fundamentales, no estamos del todo a oscuras en cuanto a la forma de proceder. Ya hemos visto que el uso del principio de gauge nos condujo a la unificación de las fuerzas débil y electromagnética en la interacción electrodébil y a la unificación de las fuerzas electrodébil y fuerte en la GUT. Con este récord de éxitos, resulta obvio que el primer camino que hay que explorar debe ser la aplicación del principio de gauge a la gravedad.

Ambas unificaciones previas comparten una propiedad importante. En cada una de ellas nos centramos en una propiedad que llamamos simetría interna y exigimos que nuestras teorías de la naturaleza no cambiaran al permitir que esta propiedad se definiera de manera arbitraria por observadores situados en puntos diferentes del espacio. En el caso de la unificación electrodébil, esta propiedad era la carga eléctrica (o. más precisamente, el spin isotrópico). Cuando hablamos de protones y neutrones, por ejemplo, imaginamos que había una pequeña aguja indicadora en cada partícula. Si la aguja apuntaba hacia arriba, la partícula era un protón; si apuntaba hacia abajo, la partícula era un neutrón. El principio de la simetría gauge indicaba que nuestra teoría no tenía que cambiar si alguien se paseaba cambiando las agujas al azar. Esta exigencia, junto con el proceso de rotura espontánea de la simetría, fue lo que nos condujo a la teoría de Weinberg-Salam de la interacción electrodébil.

Cuando quisimos unificar la fuerza fuerte con la electrodébil, la propiedad relevante era el color. En este caso la aguja tenía tres posiciones (para los tres colores) y la teoría no tenía que cambiar si esas agujas se movían al azar. En ambas unificaciones, los cambios teóricos que habrían ocurrido al mover las agujas indicadoras de las partículas eran anulados por unos cambios correspondientes en las partículas intercambiadas para generar la fuerza. El resultado neto fue una teoría que era independiente de las definiciones realizadas por observadores distintos.

Así, una manera de considerar el proceso de unificación, es decir, que convierte unas diferencias aparentemente importantes entre las partículas en simples definiciones arbitrarias. En cierto sentido, el proceso de unificación hace desaparecer las características superficiales del mundo y nos permite ver lo que es realmente importante. Al alcanzar la gran unificación, este proceso nos lleva a un mundo mucho más simple que el nuestro. En este mundo sólo hay dos clases de partículas: partículas de spin 1/2, como los quarks y los leptones, que englobamos bajo el término genérico de *fermiones*; y partículas de spin 1 como los bosones X y los fotones, a los que nos referimos colectivamente como bosones. Hay dos clases de fuerzas que operan entre estos tipos de partículas: la fuerte-electrodébil y la gravitatoria.

Las teorías de supersimetría actúan de manera tal que borran la distinción entre bosones y fermiones. Por analogía con las otras unificaciones, podemos imaginar una aguja indicadora en cada partícula elemental. Si la aguja apunta hacia arriba, la partícula es un fermión y si apunta hacia abajo, es un bosón. Igual que en el caso de las otras unificaciones, exigimos que nuestra teoría no cambie cuando estas agujas se cambien al azar, y, como en las demás unificaciones, encontramos también que podemos hacer que todo funcione si se intercambian determinados tipos de partículas para producir la fuerza básica.

En un esquema como éste, podemos considerar el sistema partícula más aguja como una superpartícula y siempre podemos imaginar interacciones en las que los bosones se trans-

forman en fermiones y viceversa, de manera muy parecida a como los quarks se transformaban en leptones por acción de los bosones X. En otras palabras, aunque los términos *bosón* y *fermión* todavía tienen un significado, las interacciones que admite la teoría de la supersimetría nos permiten cambiar partículas de una clasificación a otra. Para un físico, esto significa que las dos clases de partículas sólo son, en realidad, aspectos diferentes de una única entidad fundamental subyacente.

Por lo tanto, puede esperarse que la superunificación produzca un Universo que sea la simplicidad última. Sólo habrá un tipo de partícula básica, la superpartícula, y una sola clase de fuerza que opere en la naturaleza, la fuerza unificada gravitatoria-fuerte-electrodébil. Así, durante los primeros 10^{-13} segundos de su existencia, el Universo fue todo lo simple que podía ser. A partir de entonces, las congelaciones causadas por la expansión universal han actuado para producir cada vez más diferenciación. Sólo el intenso esfuerzo intelectual de generaciones de físicos nos ha permitido ver la verdadera simplicidad de todo.

El problema básico de las teorías de supersimetría que se investigan ahora es que parecen predecir la existencia de muchos tipos de partículas que no se han observado en el laboratorio. Por una parte, esto no puede ser demasiado sorprendente, puesto que siempre se puede invocar el mecanismo de rotura espontánea de la simetría para decir que la masa de estas partículas es muy alta —tal vez tanto como 10^{19} G*e*V— por lo que jamás se podrían observar. Esto es lo que sucedió con las partículas X que aparecieron con la gran unificación. Por otra parte, la existencia de todas estas partículas hace que la teoría sea complicada.

Podemos apreciar este punto si consideramos la versión más sencilla de la supergravedad. A bajas energías, la gravedad es una fuerza producida por el intercambio de un gravitón sin masa de spin 2, tal como hemos explicado y tal como se muestra a la izquierda de la figura 57. A energías más altas, las teorías predicen que otra partícula sin masa, llamada gravitino, empezará a adquirir importancia. Los gravitinos tienen

spin 3/2 y contribuirían a la interacción gravitatoria tal como se muestra a la derecha de la figura 57. (Por razones técnicas, los gravitinos tienen que intercambiarse por parejas y no aisladamente.) De esta manera, cuando los objetos gravitantes están alejados, como es el caso de la Tierra y la Luna, estas teorías producen la misma predicción que la relatividad general normal. Cuando los objetos se acercan mucho, como ocurriría en las violentas colisiones características de los primeros 10^{-43} segundos, el intercambio de gravitinos se hace importante y modifica la interacción gravitatoria, que aumenta su intensidad hasta ser comparable con las asociadas a las demás fuerzas.

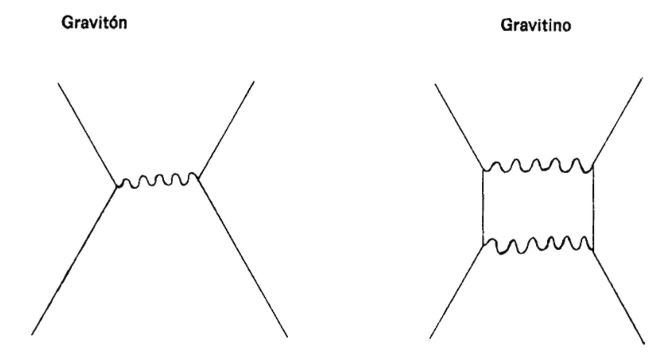


Fig. 57

Las características generales de una superunificación serían, entonces, la unificación de la fuerza gravitatoria con las demás fuerzas fundamentales y la introducción de reacciones en las que se pueden intercambiar fermiones y bosones, que tendrían como resultado un sistema en el que habría un solo tipo de superpartícula. Más allá de estas características generales y de la idea de que la unificación se produciría en el tiempo de Planck, no hay de momento guías teóricas firmes en esta área. Por otra parte, es evidente que los físicos no están de ningún modo preocupados por la manera de proceder en este último paso hacia la teoría unificada final. Ocurre sólo que el paso es técnicamente difícil y que aún no se ha completado.

LAS PREGUNTAS FINALES

Esta discusión de la supersimetría nos da una tentadora visión de cómo podría ser la física al otro lado de la barrera de Planck. Pero, por interesante que pueda ser una teoría unificada por completo, la perspectiva de que esta teoría sea desarrollada pronto nos conduce naturalmente a la pregunta final. Una vez investigado el Universo hasta el momento de la creación, ¿qué nos impide dar el paso siguiente y preguntar qué ocurrió antes del Big Bang, preguntar, en efecto, por qué existe el Universo?

Es una pregunta que hace sentir algo incómodos a los científicos. A pesar de que cualquiera que reflexione sobre la cosmología y el Universo primitivo acabe por considerar esta pregunta y a pesar de que cualquiera que esté involucrado en la difusión de los resultados de la ciencia entre el público general acabará por enfrentarse a ella, la pregunta suele eludirse de una u otra manera. De hecho, podemos identificar dos maneras generales de tratar el origen último del Universo, una derivada de la filosofía de la ciencia y otra de la relatividad general.

Todas las leyes científicas se basan en la observación y la experimentación y, por consiguiente, ninguna ley científica es en realidad válida fuera del dominio en el que ha sido comprobada. Es posible argumentar, por lo tanto, que la pregunta acerca del origen del Universo simplemente no puede contestarse dentro del método científico. Podemos descubrir leyes mediante mediciones y observaciones y probablemente es válido extrapolar estas leyes, tal como hemos hecho, al Universo primitivo. Pero no tenemos ninguna experiencia de un universo que no contenga masa y por lo tanto es impropio tratar de extender nuestro conocimiento actual a esta nueva área. La pregunta del origen del Universo, según este argumento, no puede responderse por los métodos de la ciencia y por lo tanto debe ser dejada sin formular y sin responder.

El argumento de la relatividad general es algo más técnico. Sabemos que, en el marco de esa teoría, el espacio-tiempo de cuatro dimensiones en que vivimos es el resultado de la

presencia de masa. Vimos un ejemplo de esto cuando hablamos de la órbita de la Luna. Según esta manera de considerar las cosas, el tiempo empezó cuando se creó la masa, y preguntar lo que ocurrió en tiempos anteriores a éste simplemente no tiene sentido. Tal como sugirió un grupo de autores, preguntar lo que había antes del Big Bang es como preguntar qué hay al norte del polo Norte.

Ambas posiciones son perfectamente defendibles; yo mismo he adoptado varias veces la primera al ser apremiado por mis estudiantes. Sin embargo, parece un poco descorazonador haber llegado tan lejos en nuestro estudio de la creación sólo para detenernos en seco al borde de la solución del más interesante de todos los problemas. Además, el rechazo a examinar esto, la pregunta última de la creación, me parece que está en abierta contradicción con toda la tendencia del esquema de la gran unificación.

Hemos visto que el tema central del proceso de unificación es la exigencia de que las leyes de la física sean independientes de las definiciones arbitrarias hechas por observadores exteriores. Podríamos argumentar que esta exigencia es una prolongación lógica del principio de la relatividad, que afirma que las leyes de la física no deben depender del estado de movimiento de la persona que observa los sucesos. Estos dos grandes avances de la ciencia del siglo XX parecen apuntar en la misma dirección: en un mundo incierto, el único punto de referencia firme y absoluto es el cuerpo de conocimientos que llamamos leyes de la naturaleza. Estas leyes no dependen del estado de movimiento ni de la predisposición mental del observador y, por lo tanto, cualquiera que observe la naturaleza encontrará las mismas leyes que hemos encontrado. Por lo tanto, no es un paso demasiado grande sugerir que usemos esta base firme para anclarnos cuando tratamos de empujar el conocimiento humano hacia donde no ha llegado nunca antes. Aunque la creación del Universo puede implicar un proceso que jamás hemos visto (y jamás podamos ver), vamos a suponer que las leyes de la naturaleza que hemos descubierto pueden usarse para reflexionar sobre esto.

Si preguntamos lo que puede haber ocurrido antes del Big Bang, sólo caben dos posibilidades. Una es que el Universo sea cíclico, con fases como nuestra expansión actual en alternancia con períodos de contracción. Discutiremos esta posibilidad con algún detalle en el capítulo 14, pero, de momento, señalemos simplemente que si sucede esto, la pregunta sobre el principio del Universo deja de tener importancia. El Universo siempre ha existido y siempre existirá, con un ciclo tras otro, para siempre. Este punto de vista era, por supuesto, el que mantenían los antiguos filósofos.

La otra posibilidad es que el Big Bang sea un acontecimiento único. En este caso, la mejor conjetura acerca de lo que le precedió es que antes del Big Bang no había nada, un vacío. Pero una cosa que hemos aprendido de la mecánica cuántica es que no hay nada que sea espacio vacío con nada en absoluto en él. El principio de la incertidumbre (véase cap. 5) garantiza que incluso en el mejor vacío, se crean y se aniquilan continuamente pares virtuales de partículas y antipartículas. Esto significa que el vacío es un sistema como cualquier otro y la cuestión de por qué existe el Universo puede ser abordada de una manera con significado físico. El Universo vacío (el vacío) tiene una energía que, en principio, podríamos calcular. De manera parecida, el Universo en el momento de la creación (es decir, un Universo con masa) tiene también una energía. Si este último tiene una energía menor que el primero, el vacío será inestable en un sentido muy real. Nuestra comprensión de las leyes de la naturaleza es que todos los sistemas evolucionan hacia un estado con la menor energía posible y el vacío no es una excepción a esa regla. En palabras de Frank Wilczek, de la University of California en Santa Bárbara, «tal vez la razón de que haya algo en lugar de nada sea que la nada es inestable».

La idea de que podemos describir la propia creación con las mismas leyes de la naturaleza que hemos descubierto aquí y ahora, ha sido tomada en serio por un número suficiente de gente para que proporcionemos una visión del pensamiento científico sobre este tema. Parte del trabajo más interesante sobre esta materia ha sido realizado por dos físicos teóricos de

la Universidad libre de Bruselas, en Bélgica. Francois Englert y R. Brout utilizan una delicada interrelación entre materia y expansión cosmológica para describir la creación. En esencia, tratan la creación con los mismos conceptos que se utilizarían para describir el equilibrio de un lápiz sobre su punta. Sabemos que es posible equilibrar el lápiz de esta manera, pero también sabemos que si hay cualquier pequeña desviación de la verticalidad, la fuerza de la gravedad entrará en acción y desviará aún más el lápiz. El efecto neto de la más pequeña desviación es la caída del lápiz.

Podemos considerar que esta inestabilidad surge de una especie de círculo vicioso. Primero, el lápiz, por una razón u otra, se desvía un poco de la vertical. Esto hace que la gravedad ejerza una fuerza que tiende a hacer girar el lápiz alrededor de su punta, que a su vez hace que el lápiz se incline más, lo que aumenta la susceptibilidad del lápiz a la gravedad, lo cual produce una desviación aún mayor, y así sucesivamente. Esta especie de efecto de refuerzo es típico de los sistemas inestables.

Brout y Englert argumentan que en un Universo sin masa existe una situación similar. Si imaginamos que el espacio vacío es una lámina elástica de caucho con una malla marcada encima de ella (tal como hicimos para nuestra descripción de la relatividad general), podemos imaginar también que habrá pequeñas perturbaciones en la lámina. Como mínimo, el proceso cuántico de creación y aniquilación de pares producirá este efecto. Brout y Englert argumentan que si en un punto cualquiera se inicia una expansión del espacio (imaginémoslo como un estiramiento microscópico de la goma), el efecto sería el mismo que una pequeña inclinación del lápiz en equilibrio. En su teoría, la presencia de la expansión conduciría a la creación de una pequeña cantidad de materia. Este proceso de creación se produciría por los medios ordinarios de la mecánica cuántica. La materia ocasionaría entonces más expansión, que crearía más materia, que a su vez causaría más expansión y así sucesivamente. Igual que la caída del lápiz, la inestabilidad del Universo proseguiría hasta que se hubiera creado suficiente materia para que su aspecto fuera el que

esperaríamos que tuviera en el tiempo de Planck. En este esquema, no hubo Big Bang sino una lenta acumulación progresiva de materia hasta que la densidad fue lo suficiente alta para situar el Universo en el falso vacío (véase cap. 11). A partir de este punto, la historia del Universo sería idéntica a la de cualquier sistema inflacionario.

Lo intrigante de este esquema es que la pregunta: “¿Qué sucedía antes del Big Bang?” se responde con la afirmación: "No hubo Big Bang.” El tiempo no empieza en un punto particular sino que se alarga hacia atrás hasta menos infinito. Hasta el final de lo que Brout y Englert llaman la época de creación, prosigue el proceso de creación de materia a partir de la inestabilidad básica. Pero antes del tiempo de Planck, se ha acumulado suficiente materia para cambiar el carácter del sistema y el resto de la expansión continúa tal como hemos descrito en los capítulos anteriores. El punto crucial en el Universo primitivo es análogo al momento en que el lápiz, al caer, golpea la mesa. La nueva situación produce un nuevo tipo de comportamiento.

Podemos comparar este tipo de modelo con los modelos de Big Bang que hemos discutido mediante un gráfico de la densidad del Universo en función del tiempo, tal como se muestra en la figura 58. El Big Bang queda descrito por una expansión que empieza en un punto infinitamente denso y que prosigue suavemente a partir de este punto. En la figura 58, esto se representa por medio de la línea descendente, que indica una caída uniforme de la densidad a medida que prosigue la expansión. (La densidad tiene que disminuir en este caso, ya que la misma cantidad de materia tiene que llenar un volumen mayor.) Por el contrario, el modelo inflacionario discutido en el capítulo 11, aunque empieza también a partir de un punto infinitamente denso, atraviesa un período de rápida expansión con una densidad constante. Esto es lo que llamamos la era inflacionaria y está representada por la línea horizontal del gráfico. Por último, el Universo escapa por efecto túnel del falso vacío, se crean grandes cantidades de partículas y el modelo inflacionario se vuelve idéntico al modelo normal de Big Bang.

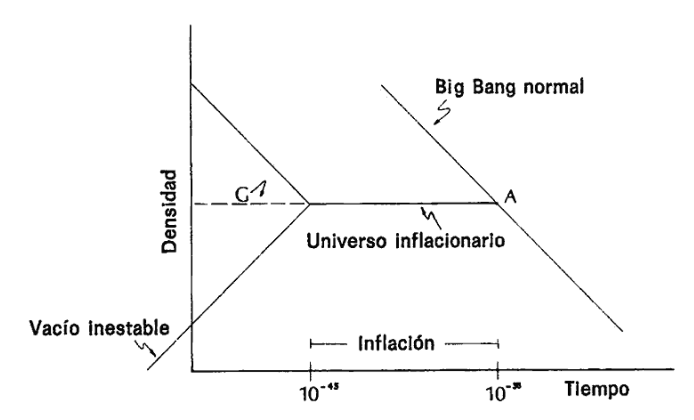


Fig. 58

Sin embargo, ambas versiones de la creación empiezan con una singularidad, un punto en que la materia se encuentra en un estado infinitamente denso. Esto puede tener sentido matemáticamente, pero es difícil ver cómo podríamos aplicar cualquier ley de la física a esta situación. El modelo de vacío inestable que acabamos de describir, por el contrario, tendría un incremento gradual de densidad hasta alcanzar el estado de falso vacío, punto en el que seguiría su curso como el modelo inflacionario normal.

Otros teóricos han propuesto otras vías para enfocar el problema de la creación evitando las dificultades asociadas al punto singular. Richard Gott de la Princeton University, por ejemplo, ha trabajado en un modelo en el que el Universo se crea con una densidad apropiada para el falso vacío, en lugar de una densidad nula o infinita. Este modelo vendría representado por la línea horizontal marcada G en la figura 58. Podría imaginarse que, en este modelo, el Universo va a parar al falso vacío por efecto túnel, para volver a escapar más tarde de él por el mismo efecto.

Todos estos modelos de la creación tienen algo en común: consideran la aparición del Universo como una fluctuación cuántica, un suceso aleatorio; una vez ha ocurrido el suceso, las leyes de la física toman las riendas y se desarrolla nuestro Universo actual. Las leyes de la física describen incluso el

proceso de fluctuación pero no dan ninguna razón imperiosa de por qué el Universo tuvo que iniciar su existencia. Podría ser, entonces, en palabras del físico Edward Tryon, que «nuestro Universo es simplemente una de esas cosas que ocurren de vez en cuando».

XIV. EL DESTINO DEL UNIVERSO

Cuando tú y yo *estemos en el otro mundo,*
oh, cuánto, cuánto tiempo durará aún la Tierra.

RUBAIYAT DE OMAR KHAYYAM

«No se acaba hasta que termina.»

YOGI BERRA

Ninguna discusión sobre cosmología sería completa si limitáramos nuestra atención de forma exclusiva a la cuestión de los orígenes del Universo. Dado que hemos rastreado nuestras raíces hasta más allá del tiempo de Planck y que hemos visto dónde se sitúan las fronteras del conocimiento en esta dirección, es natural que volvamos nuestra mirada en la dirección opuesta, hacia el futuro. Esto cambia el centro de nuestra atención y el "de dónde venimos" pasa a ser el "hacia dónde vamos".

Los obstáculos, fundamentales para conseguir una respuesta clara a la primera de estas preguntas han sido más bien teóricos que experimentales. Hemos tenido que desarrollar y probar teorías capaces de describir unas interacciones que se realizan a energías mucho más altas que las consideradas anteriormente. Con la GUT se alcanzó un hito importante en el camino hacia la comprensión total, y hay grandes esperanzas de que la idea de la supersimetría nos conduzca a una teoría verdaderamente unificada de las interacciones elementales. Se han realizado algunas pruebas experimentales de las teorías unificadas y otras están en curso de realización, pero todas estas pruebas implican procesos de laboratorio. No había necesidad, al aplicar los conceptos GUT, de obtener nuevos datos de observación sobre el propio Universo. Las teorías se requerían para explicar hechos ya conocidos; no precisaban de nuevas observaciones para guiar su desarrollo.

Cuando miramos hacia el futuro la situación se invierte. La relatividad general y algunos resultados básicos de la mecánica cuántica y de la termodinámica son suficientes para describir el Universo tan lejos en el futuro como nos es posible ver. Lo que no tenemos de momento es una medida lo suficiente precisa de la densidad de materia del Universo para poder decir con certeza entre dos posibles futuros cuál de ellos nos espera. Por lo tanto, el progreso en la predicción del destino del Universo depende de nuestra capacidad para mejorar nuestra habilidad de observación, más que de especulación teórica.

A pesar de que la Tierra y el Sol no constituyen una parte importante de nuestra galaxia y de que la Vía Láctea es sólo una galaxia entre miles de millones, tenemos, sin embargo, cierto interés en conocer su futuro. El Sol tiene ahora una edad de unos 5.000 millones de años. En otros 5.000 millones de años habrá consumido todo su hidrógeno combustible. Se convertirá en lo que los astrónomos llaman una gigante roja, y la Tierra quedará sumergida en él. Excepto en el caso de las estrellas muy pequeñas y de vida muy larga, 10.000 millones de años es un tiempo de vida típico para una estrella. Durante este período de tiempo, una estrella toma helio primordial e hidrógeno, lo procesa en su homo nuclear y muere. Según la masa de la estrella, el producto final puede ser una enana blanca (éste será el destino del Sol), una estrella de neutrones o un agujero negro. Pero, cualquiera que sea el producto final de la evolución estelar, siempre que una estrella completa el ciclo vital, consume una cierta cantidad de materia prima. En 40.000 o 50.000 millones de años, suponemos que la formación estelar se habrá frenado considerablemente respecto a lo que vemos hoy en día. En nuestra propia galaxia, los astrónomos verán que las estrellas se van apagando, primero las brillantes (que queman su combustible con prodigalidad y por lo tanto mueren antes) y luego las estrellas más moderadas como el Sol. El período de formación de estrellas, que empezó con la aparición de las galaxias 500.000 años después del Big Bang, llegará a su fin.

LA EXPANSIÓN UNIVERSAL

El siguiente paso en nuestro examen del futuro es alejarnos del punto de vista relativamente local de nuestra vecindad inmediata y preguntarnos sobre el destino del Universo como un todo. Tal como vimos en el capítulo 1, la propiedad más sorprendente del Universo como un todo es la expansión, con todas las galaxias que se alejan unas de otras. Es razonable preguntarse si esta expansión continuará para siempre o si se detendrá algún día.

La mejor forma de considerar esta cuestión es imaginar una pelota lanzada hacia arriba desde la superficie terrestre. Sabemos que al final la pelota perderá velocidad, se detendrá e invertirá su dirección a causa de la atracción gravitatoria de la Tierra. Sin embargo, si se lanzara la pelota con una velocidad suficiente (más de 11 kilómetros por segundo), sabemos que no caería, sino que, por el contrario, se alejaría por el espacio. La cuestión general de si la pelota volverá a caer al suelo depende de dos cosas: la velocidad con que se mueve y la fuerza con que la Tierra tira de ella. La fuerza de gravedad que ejerce la Tierra depende, a su vez, de la cantidad de materia que ésta contiene.

Podemos imaginar la expansión actual del Universo de la misma manera. Una galaxia dada se aleja ahora de nosotros a una velocidad determinada, que podemos medir. Si llegará a detenerse y empezará a retroceder hacia nosotros depende de la atracción gravitatoria que ejerce el resto del Universo sobre ella. Si hay suficiente materia para ejercer una fuerza lo bastante intensa, podemos esperar que el Universo en expansión empiece algún día a contraerse. Si no hay suficiente materia en el Universo, la expansión puede frenarse un poco pero no se detendrá nunca. La primera pregunta que debemos planteamos al intentar averiguar el futuro del Universo es, por lo tanto, si el Universo es abierto, cerrado o plano.

Esta manera particular de abordar la cuestión, aunque es fácil de imaginar, es algo imprecisa desde el punto de vista de la relatividad general. En el capítulo 13 vimos que la fuerza gravitatoria se interpreta en términos de la curvatura del espa-

cio debida a la presencia de materia. La analogía de la distorsión de una lámina elástica es una forma fácil de representar este modo de ver las cosas. Cuanta más masa hay, la distorsión es, por supuesto, mayor.

En términos de este modo de considerar la gravedad, un universo cerrado sería aquel universo en el que la cantidad de materia es tan grande que la lámina elástica se encuentra curvada sobre sí misma, de manera que ningún cuerpo puede estar a una distancia infinita de otro. Se pueden aplicar definiciones similares a los términos *plano* y *abierto.*

Puede parecer extraño que no conozcamos lo suficiente de la estructura del Universo para responder esta pregunta fundamental. Después de todo, nuestros telescopios son capaces de detectar galaxias a más de 10.000 millones de años luz de distancia. ¿Por qué no sumamos simplemente toda la masa que vemos y obtenemos una respuesta?

Si sumamos simplemente las masas estimadas de todas las galaxias y estrellas que podemos observar con nuestros telescopios, sólo tendríamos un pequeño porcentaje de la cantidad de materia necesaria para cerrar el Universo. Parecería que tuviéramos que concluir que el Universo es abierto.

Pero esta afirmación es prematura, ya que depende de la hipótesis de que podemos observar toda la materia existente. Sabemos que esto no siempre es cierto. Por ejemplo, alguien que observe el Sistema Solar desde otra estrella vería el Sol porque es luminoso, pero probablemente no vería ningún otro de los cuerpos masivos que sabemos que están aquí: planetas, asteroides, cometas, etc. En el caso del Sistema Solar, quizás esto no sea demasiado importante, ya que todos estos cuerpos sólo suman una pequeñísima fracción de la masa del Sol. Pero al observar las galaxias, la situación puede ser diferente. Puede ser muy bien que un gran porcentaje de la masa de una galaxia no sea visible para alguien que la observa con un telescopio. Si la materia que vemos no cierra el Universo, tal vez la materia que no vemos sí lo haga.

Existen varios indicios de que podría haber una gran cantidad de materia todavía sin detectar. Uno de ellos proviene del estudio de las propias galaxias y el otro del estudio de los

cúmulos de galaxias. Las galaxias como la Vía Láctea y nuestra vecina más cercana, Andrómeda, tienen forma espiral y giran alrededor de su centro. El Sol, por ejemplo, traza un gran círculo por la Vía Láctea cada 200 millones de años aproximadamente. Esta rotación es, en general, muy compleja, con partes distintas de la galaxia que se mueven a velocidades diferentes. Hay, sin embargo, un aspecto de la rotación galáctica que podemos estar seguros de comprender y que es el comportamiento que debería tener la materia en los bordes más exteriores del sistema. Del mismo modo que los planetas exteriores, como Júpiter y Saturno, se mueven más lentamente en sus órbitas que la Tierra, también la materia de la franja exterior de una galaxia tendría que mostrar una gradual disminución de velocidad al aumentar la distancia que le separa de aquélla. Decimos que la rotación debería ser kepleriana (en honor al físico Johannes Kepler, el primer científico que describió con detalle el comportamiento de los planetas en el Sistema Solar).

Cuando hablamos de la "franja exterior" de una galaxia en este contexto, estamos hablando de la tenue materia que está situada más allá de la estrella más lejana. Esta materia, en su mayor parte átomos de hidrógeno, no emite luz, por lo que no puede observarse a simple vista ni con un telescopio ordinario. Sin embargo, emite ondas radio, lo que nos permite detectar su presencia y determinar su velocidad de rotación. Estos mapas radio de las galaxias revelan un hecho sorprendente. En la mayoría de galaxias, los filamentos de gas hidrógeno giran tan deprisa como las estrellas y no muestran ningún indicio del esperado comportamiento kepleriano. Es como si midiéramos el Sistema Solar y encontráramos que Júpiter se movía tan deprisa como la Tierra.

La única forma de explicar este hecho desconcertante es suponer que el gas hidrógeno que vemos está afectado por una gran cantidad de materia de la galaxia; materia que permanece sin detectar, excepto por su efecto sobre el hidrógeno. Por lo tanto, todas las galaxias están rodeadas por un extenso halo de materia invisible, un halo que podría muy bien contener más materia que las mismas estrellas. La mayoría de es-

timaciones sitúan la masa de los halos entre dos y diez veces la masa visible de la galaxia.

Lo que nos indican los halos galácticos es que no debemos precipitarnos en afirmar que el Universo es abierto. Aunque sólo podamos observar un pequeño porcentaje de la materia necesaria para invertir la expansión universal, sabemos ahora que hay, sin duda, una gran cantidad de materia en el Universo que no podemos ver. Si suponemos que la mayoría de las galaxias tienen halos, deberíamos multiplicar la cantidad de materia visible por un número entre 2 y 10 para tener una idea de cuánta masa existe realmente. Por supuesto que al hacerlo nos quedamos aún a una buena distancia de la cantidad crítica de masa, pero este episodio nos hace pensar si no habrá otras masas no visibles que esperan ser descubiertas.

Otro candidato para materia no visible surge de los estudios de los astrónomos sobre los cúmulos de galaxias, que son grandes concentraciones de materia que contienen miles de galaxias como la Vía Láctea. Las observaciones de estos cúmulos muestran que su población es demasiado densa para que sean agrupaciones al azar, pero que las galaxias que los constituyen se mueven demasiado deprisa para permitir que el cúmulo permanezca unido mucho más de 100 millones de años, un tiempo muy corto a escala cosmológica. La única manera de explicar el aspecto de estos cúmulos (y también algunos detalles de su estructura) es suponer que en el cúmulo hay mucha más materia de la que se puede ver. Un cúmulo típico tendría de diez a cuarenta veces más materia de la que se estimaría al tomar sólo en cuenta la materia luminosa. La mayor parte de esta materia estaría constituida, por supuesto, por los halos, pero, a parte de éstos, en los cúmulos de galaxias hay más materia no visible, un hecho que tendría que hacernos más remisos a la hora de concluir precipitadamente que el Universo es abierto.

Toda esta discusión de la materia no visible concierne a la determinación de la densidad de materia del Universo a fin de que, si conocemos el ritmo de expansión actual, podamos decidir si el Universo es abierto o cerrado. Hay que dejar claro, sin embargo, que la cuestión también puede decidirse si

se conoce la densidad de materia y el ritmo de expansión existentes en *cualquier* momento. Si sometemos a consideración el Universo durante el período de nucleosíntesis tres minutos después del Big Bang, podemos llegar a una conclusión razonable, aunque indirecta, sobre este tema. El ritmo de expansión en aquel momento es fácil de calcular y la densidad de protones y neutrones puede deducirse de la cantidad de deuterio y helio que se produjo. (Recordemos que la producción de deuterio era el impedimento en la creación de los núcleos en aquel momento.) El resultado que se obtiene de este tipo de cálculo, aunque sujeto a ciertas condiciones, como la suposición de que la abundancia de deuterio en la Tierra es típica de la abundancia de deuterio en todas partes, es inequívoco. Si contamos sólo la materia en forma de bariones, el Universo es abierto. Se deduce de esto que, si el Universo tiene que ser cerrado, la masa adicional tiene que estar presente en alguna forma distinta de los protones y neutrones ordinarios.

Por lo tanto, toda la evidencia que tenemos parece indicar que la masa del Universo está muy cerca del valor crítico necesario para un sistema apenas cerrado (o abierto). Esta situación es lo que antes hemos llamado el problema del Universo plano. Además, tal como muestra la discusión de la masa oculta, el verdadero valor de la densidad de masa es probable que esté muy cerca del crítico, tal vez dentro de un factor 2.

Sin embargo, si queremos hablar del futuro del Universo, esta afirmación no es lo suficiente clara. Necesitamos saber si la expansión se invertirá o no, y, dado el estado actual de nuestro conocimiento observacional, no podemos hacer esta distinción. Por consiguiente, tendremos que considerar las dos alternativas y ver lo que el futuro nos reserva para cada una de ellas.

FUTURO CERRADO

Empecemos por suponer que, por alguna razón, la naturaleza ha optado por esconder el 95% de la masa del Universo en lugares muy difíciles de espiar y que el Universo es en realidad cerrado. En este caso podemos esperar un futuro espectacular. El Universo seguirá su expansión durante otros 40.000 o 50.000 millones de años, pero cada vez con más lentitud. Luego, como la pelota que vuelve a caer al suelo, la expansión se invertirá y empezará una gran contracción. En lugar de un Universo en el que la luz de las galaxias lejanas se desvía hacia el rojo (lo que indica que la fuente se aleja de nosotros), encontraremos un Universo en el que la luz experimenta un corrimiento hacia el azul.

Cuando el Universo tenga de nuevo su tamaño actual, dentro de unos 80.000 o 100.000 millones de años, la Tierra y el Sol estarán muertos desde hace mucho tiempo. Si por entonces aún quedan seres humanos, estarán viviendo, sin duda, en ambientes artificiales alrededor de estrellas cuyo nacimiento está aún inimaginablemente lejos en el futuro. Tal como hemos argumentado, las galaxias serán bastante menos luminosas de lo que son ahora, con grandes poblaciones de enanas blancas, estrellas de neutrones y otros objetos de brillo muy débil. A medida que progrese la contracción, el cielo nocturno empezará lentamente a brillar cuando la radiación cósmica de fondo inicie su corrimiento hacia la parte visible del espectro y, por último, el cielo resplandecerá de luz, día y noche. Por entonces, el Universo se habrá contraído a menos de una milésima parte de su tamaño actual. Los átomos y las moléculas del espacio interestelar se disociarán en sus núcleos y electrones constituyentes, y por último los propios planetas y estrellas se disolverán en un mar universal de materia caliente. A partir de este punto, se repetirán las etapas del Big Bang que describimos antes, pero en sentido inverso —los núcleos se disociarán en protones y neutrones, los protones y neutrones se disociarán en quarks—, hasta alcanzar el estado original en el que empezó el Big Bang.

Este modelo conduce inevitablemente a la más fascinante de las preguntas: ¿La contracción universal (que los cosmólogos, medio en broma, llaman el Big Crunch, o gran aplastamiento) irá seguida por otra expansión (el Big Bounce, o gran rebote)? En otras palabras, ¿renacerá el Universo de sus cenizas, como el ave fénix, para repetir todo el ciclo? La imagen de un Universo que renace cada 100.000 millones de años resulta muy atractiva para algunos. La ventaja principal de un Universo en eterna oscilación es que no hay que plantearse las preguntas de por qué empezó y de dónde surgió. El Universo siempre ha existido y siempre existirá. Dentro de 100.000 millones de años el Universo volverá a estar constituido por un gran conjunto de galaxias que se separan.

Es una idea fascinante, pero antes de ir demasiado lejos en la especulación, debo advertir que, con la imagen de un Universo oscilante, se plantean algunos problemas graves. Por una parte, a menos que durante alguna parte del ciclo cambien algunas de las leyes básicas de la física, el desorden medio del Universo aumentaría con cada rebote, por lo que, al final, el sistema dejaría de funcionar. Y, por supuesto, toda la idea de las oscilaciones depende de la presencia de una cantidad de masa suficiente para invertir la expansión e iniciar el Big Crunch. Tal como hemos visto, nuestros datos actuales parecen favorecer un tipo de futuro bastante diferente.

FUTURO ABIERTO

Si el Universo es abierto o plano, no ocurrirá ninguna inversión de la expansión y el futuro será verdaderamente infinito. A corto plazo el Sol se apagará y la formación de estrellas disminuirá tal como hemos descrito. Las estrellas pequeñas y de combustión lenta estarán en proceso de extinción cuando la edad del Universo alcance los 10^{14} años, unas mil veces su edad actual. A escalas de tiempo más largas, empiezan a adquirir importancia otras clases de disipación. Por ejemplo, aproximadamente cada 10^{15} años, puede esperarse que las estrellas con sistemas planetarios se acerquen lo sufi-

ciente unas a otras para que los planetas sean arrancados de sus órbitas. Las estrellas de las partes exteriores de la galaxia se evaporarán en una escala de tiempo de 10^{19} años, mientras que las estrellas densamente apiñadas del centro galáctico se desplomarán en un gran agujero negro. Cuando el Universo sea mil millones de veces más viejo que ahora, veremos un mar cada vez más tenue de radiación en el que estarán incrustados aquí y allá algunos agujeros negros. Diseminados entre estos hitos en la nada, se encontrarán los residuos sólidos de las estrellas evaporadas y el polvo y otros restos que hayan escapado de la captura hasta el momento. El Universo mantendrá este aspecto hasta que su edad alcance los 10^{31} años.

En este punto tenemos que preguntamos acerca del destino de la materia sólida que queda en el Universo. Según la GUT, los protones y neutrones que constituyen toda la materia son inestables y se desintegrarán con un tiempo de vida de unos 10^{32} años. Si la materia es realmente inestable a esta escala de tiempo tan larga, en este momento desaparecerá la materia sólida restante al desintegrarse sus constituyentes. El efecto neto a largo plazo de esta desintegración será la eliminación de la materia sólida del Universo, con la producción durante el proceso de alguna radiación adicional y electrones y positrones muy separados.

El Universo seguirá en su proceso de expansión y enfriamiento. De vez en cuando, algunas de las partículas caerán en un agujero negro y al hacerlo producirán rayos X. Un hipotético astrónomo que observara el Universo estaría muy aburrido ya que esta situación se prolongaría hasta que hubieran transcurrido 10^{65} años.

Entramos ahora en unas escalas de tiempo tan largas que es casi imposible imaginarse tantos ceros. Una forma útil de visualizar la situación es imaginar que vemos el Universo en una película. Supongamos que al principio de la película cada minuto de proyección equivale a 10.000 millones de años de historia. Se tardaría algo menos de 2 minutos en ver todo lo sucedido hasta la era presente, unos 15.000 millones de años después del Big Bang. Dejaremos que la película vaya a esta velocidad durante 10 minutos, un proceso que nos llevará a

una edad de 100.000 millones de años. Si el Universo es cerrado, el Big Crunch ocurriría más o menos entonces. Después de 10 minutos de proyección, aumentamos la velocidad del film en un factor 10, de forma que cada minuto de visión corresponde ahora a 100.000 millones de años, con lo que 10 minutos nos llevarían a una edad de un billón (10^{12}) de años. Se requerirían tres de estos cambios de velocidad de la película para abarcar la extinción de las estrellas pequeñas, otro para ver cómo los planetas eran arrancados de sus órbitas y quedaban sueltos y cuatro cambios más después de éste para ver disolverse las galaxias. Se requerirían 13 aumentos más de velocidad (21 en total) para alcanzar el punto en que se espera que los protones se desintegren y entonces tendríamos que sentamos y esperar no menos de 34 cambios de velocidad antes del siguiente acontecimiento interesante.

Solemos considerar los agujeros negros como cuerpos tan masivos que nada puede escapar a su atracción gravitatoria, ni tan sólo la luz. Pero para escalas de tiempo largas resulta que esto no es del todo cierto. Cuando la temperatura de la radiación de fondo sea suficientemente baja, los agujeros negros emitirán radiación térmica. En cierto modo, el agujero negro es como el rescoldo de un fuego, que emite calor a su alrededor, calor que en el caso de un rescoldo se puede notar con la mano. Cuando la película estuviera pasando a una velocidad de 10^{65} años por minuto, un agujero negro del tamaño de la Tierra empezaría a radiar energía y, a medida que lo hiciera se volvería cada vez más brillante. En 1 minuto de tiempo del film, el agujero negro iluminaría el cielo y luego desaparecería, y sólo quedaría de él una contribución al mar de radiación en expansión. A medida que el film se acelerara y aumentara su velocidad cada 10 minutos, unos agujeros negros cada vez mayores experimentarían el mismo proceso y se evaporarían a su vez, y todo lo que veríamos durante los 40 cambios siguientes de velocidad de la película sería un Universo en expansión con ocasionales fuegos de artificio cada vez que se extinguiera un agujero negro. Este proceso continuaría hasta desaparecer todos los agujeros negros y, en el momento que terminara, la película estaría pasando a una velocidad de 10^{105}

años por minuto. Habríamos estado mirando la película durante algo menos de 18 horas.

En este punto habríamos alcanzado el final de nuestra historia, ya que no quedaría nada en el Universo para producir ningún cambio. Esto significa que todos los posibles futuros del Universo abierto terminan de la misma forma. En un remoto tiempo en el futuro, el Universo será un mar frío y tenue de radiación en expansión, con unas cuantas partículas abandonadas para romper la monotonía. Tal vez fue esta sombría perspectiva lo que hizo decir a Steven Weinberg: «Cuanto más comprensible resulta el Universo, más inútil parece.»

EPÍLOGO

Ahora que hemos averiguado el principio y el fin del Universo, todo lo que tenemos que hacer es construirlo antes del viernes.

DON MOSER

DEFINICIÓN DE LA FRONTERA

Después de repasar los extraordinarios avances que se han hecho en la comprensión del Universo primitivo, es natural preguntarse qué puede suceder ahora y en un futuro inmediato. Por el momento, podemos representar la frontera del conocimiento como una línea bastante borrosa que atraviesa el área general de las teorías de la gran unificación. Un optimista diría que la GUT cae dentro de los límites de la ciencia establecida y que los problemas pendientes son más una cuestión de detalle que de fondo. Un pesimista pondría de manifiesto que de momento no hay una evidencia experimental firme para la GUT y que tampoco hay acuerdo sobre materias tan importantes como la naturaleza de la verdadera simetría subyacente. En términos de la escala temporal de nuestro Big Bang, el optimista diría que hemos conseguido llegar hasta el tiempo de Planck, a los 10^{-43} segundos, mientras que el pesimista optaría por algo más cercano a los 10^{-35} segundos. Sin embargo, ambos tendrían que reconocer que la frontera ha retrocedido mucho desde donde estaba hace una década. La falta de definición en la situación exacta de la frontera del conocimiento no es particularmente importante. De hecho, es lo que esperaríamos de una disciplina que experimenta un rápido crecimiento.

Ya hemos esbozado cuál es probable que sea la siguiente etapa en el proceso de unificación. El problema teórico tiene dos aspectos: primero, el desarrollo de una descripción cuán-

tica de la pravedad y, segundo, la unificación de esta teoría con la GUT. Este es un tema de intensa investigación en la actualidad. Si estos esfuerzos tienen éxito, podremos hacer que nuestro conocimiento del Universo primitivo llegue hasta el momento mismo de la creación. Lo que podamos encontrar cuando lleguemos allí y si realmente podremos describir el propio proceso de la creación son en la actualidad temas de especulación. Nuestro conocimiento actual no nos permite ver con claridad cuáles serán las respuestas a estas preguntas.

Éstas son las preguntas teóricas inmediatas que no están resueltas. Hay otro conjunto de preguntas, más fundamentales, que cabe formular. Por ejemplo, sabemos que las masas de unificación para las unificaciones electrodébil y fuerte son, respectivamente, de 100 G*e*V y 10^{15} G*e*V. ¿Por qué tienen que ser tan absolutamente diferentes? ¿Es cierto en realidad que después de que acabemos de construir la ronda actual de aceleradores capaces de investigar interacciones del orden de los 100 G*e*V, nos encontremos frente a un gran desierto en el que no sucede nada interesante hasta la energía imposible de alcanzar de 10^{15} G*e*V? Si esto resultara cierto, sería un hecho sin precedentes en la historia de la física. Después de todo, la diferencia entre la energía necesaria para romper un átomo y la necesaria para romper un núcleo es de sólo cinco o seis órdenes de magnitud (la primera es de unos cuantos electronvoltios y la última de unos cuantos millones de electronvoltios). Desde la energía necesaria para romper los núcleos hasta la necesaria para producir partículas, hay sólo tres órdenes de magnitud (desde los millones de electronvoltios a los GeV) y dos órdenes de magnitud, más allá encontramos la unificación electrodébil a los 100 GeV. Un salto de trece órdenes de magnitud antes de la gran unificación sería muy difícil de comprender. Los teóricos lo llaman el problema de escala. Es poco probable que se pueda resolver pronto.

TRIUNFO DEL REDUCCIONISMO

Hay un aspecto importante de los avances de la física discutidos en este libro que aún no hemos mencionado. Estos avances representan el resultado final de una vieja meta científica y filosófica. La ciencia occidental se ha basado ampliamente en la idea de que la forma de comprender cualquier cosa en el mundo físico es descomponerla en sus partes constituyentes. De este modo, se llega a que la materia está formada por átomos; los átomos, por partículas; las partículas, por quarks; y así sucesivamente. Es una manera de considerar las cosas que los filósofos llaman reduccionismo. La hipótesis básica del reduccionismo es que la realidad subyacente es simple y bella y que la aparente complejidad del mundo es el resultado de relaciones complejas entre objetos simples. Por ejemplo, un ladrillo es un objeto simple, pero pueden juntarse ladrillos para fabricar todo tipo de estructuras complicadas.

Durante los años sesenta y setenta, cuando la complejidad del mundo de las partículas se ponía de manifiesto en un experimento tras otro, algunos físicos dejaron de tener fe en la filosofía reduccionista y empezaron a buscar una guía fuera de la tradición occidental. En su libro *The Tao of Physics*, por ejemplo, Fritjhof Capra argumentaba que la filosofía del reduccionismo había fracasado y que era hora de tener una visión más holística y mística de la naturaleza.

Pero ahora vemos que este punto de vista, generado durante lo que resultó ser una era temporal de creciente complejidad, no ha resistido el paso del tiempo. Hemos visto que la introducción de la idea de los quarks ha reducido la complejidad de las partículas elementales y que el desarrollo de la idea de simetría gauge ha reducido la aparente complejidad de las fuerzas fundamentales. De hecho, estamos en el borde del triunfo final de la idea reduccionista. Dentro de unos años, podemos muy bien comprobarlo si investigamos con suficiente profundidad, encontraremos un Universo que representa la sencillez y belleza total. Toda la aparente complejidad que vemos se comprenderá en términos de un sistema subyacente en el que partículas de un solo tipo interaccionan entre sí a

través de una sola clase de fuerza. Si en realidad se desarrolla este tipo de teoría, será la culminación de una búsqueda filosófica que empezó hace más de dos milenios en las colonias jónicas griegas.

Otra importante tradición de la ciencia occidental ha sido la separación entre el observador y lo que se observa. En la física clásica esta idea adoptó la conducta de exigir que el acto de observación no tuviera ningún efecto sobre el sistema observado. Como hemos visto, el principio de incertidumbre muestra que no se puede llevar a cabo esta separación rígida entre sujeto y objeto en el mundo subatómico. En ese mundo, el acto de observación implica necesariamente una interacción de una partícula con otra y esta interacción tiene que perturbar ambas partículas. Efectos como el intercambio de partículas virtuales y el efecto túnel cuántico son consecuencias medidles y comprobables del principio de incertidumbre.

Sin embargo, existe una amplia sensación de que el desarrollo de las teorías gauge refuerza la idea de separación entre sujeto y objeto, que constituye una parte tan importante de nuestra experiencia cotidiana. Me parece que el punto esencial implícito en esta separación es que hay realmente un mundo físico que puede conocerse y que este conocimiento debe ser independiente de la persona que lo posee. Esto no puede establecerse a nivel de hechos experimentales a causa del principio de incertidumbre, pero las teorías gauge parecen indicar que puede establecerse a un nivel mucho más profundo.

Las teorías gauge implican que las descripciones correctas de la naturaleza son aquellas que no dependen de definiciones arbitrarias hechas por observadores distintos. De hecho, las teorías exigen que no haya ninguna medición que pueda realizarse en el laboratorio y que varíe si cada observador del mundo hace un cambio arbitrario en sus definiciones de carga eléctrica, carga de color, o incluso partículas elementales. El principio gauge, por lo tanto, nos indica que las únicas teorías que pueden describir correctamente el mundo natural son aquellas que son completamente independientes de la predisposición mental de diferentes observadores. En este aspecto,

se hacen eco de los éxitos anteriores de la teoría de la relatividad, que exige que no haya ninguna ley de la naturaleza que dependa del estado de movimiento de los observadores individuales. El efecto neto de estas dos teorías es abrir una brecha nueva y más profunda que nunca entre el mundo observado y quien hace la observación. En efecto, nos indican que la descripción correcta del mundo es aquella en la que el observador es irrelevante. Cualquier otra descripción violaría el principio gauge y produciría una teoría incorrecta.

Por lo tanto, puede considerarse que la década de los setenta fue el período en el que se vindicaron plenamente las grandes tradiciones del pensamiento científico occidental, que parecían amenazadas por los avances de la ciencia del siglo XX. Es de suponer que esta realización tarde un poco en difundirse a partir de un pequeño grupo de físicos teóricos y se incorpore a nuestra visión general del mundo.

¿QUE HACER CON DIOS?

Cuando hablo con mis amigos del hecho de que las fronteras del conocimiento son empujadas sin cesar hacia el momento de la creación, me preguntan muchas veces acerca de las implicaciones religiosas de la nueva física. Es evidente que existen estas implicaciones, en particular en las especulaciones acerca de cómo empezó a existir el Universo. Los físicos suelen sentirse muy incómodos con este tipo de pregunta, puesto que no se puede responder con los métodos normales de nuestra ciencia. Por si son útiles a alguien, daré aquí mis puntos de vista personales sobre el tema, con la advertencia de que puede que no sean compartidos por otros científicos.

Me parece que la inquietud que siente la gente cuando reflexiona sobre el tipo de avance científico implícito en la nueva física surge de la idea de que la aplicación de las técnicas de la ciencia a la creación del Universo es algo que invade el terreno reservado a la religión. Imagino que esto es lo que sentían nuestros antepasados en el siglo XIX cuando Darwin

se decidió por último a aplicar las leyes de la biología evolutiva a los seres humanos. Sin embargo, podemos ver, en retrospección, que el hecho de que los seres humanos hayan evolucionado a partir de formas de vida inferiores no daña los principios fundamentales de las creencias religiosas de nadie. Si tomamos el cristianismo como ejemplo, la evolución es simplemente irrelevante para la doctrina de la salvación a través de la fe o para cualquier otra enseñanza importante.

Sospecho que si tenemos éxito en la comprensión de los misterios del momento de la creación, nuestros descendientes tendrán más o menos la misma actitud hacia ese hecho que la que tenemos nosotros hacia la evolución. La razón de esta expectativa tiene que ver con la naturaleza del proceso científico. No importa lo que profundicemos en cualquier tema científico, siempre encontraremos algo inexplicado e indefinido. Los filósofos medievales dieron la Tierra por hecha y atribuyeron su existencia al especial trabajo creador de Dios. En el siglo XIX, se comprendió que la existencia del Sistema Solar se infería de manera natural de la ley de la gravedad y de la existencia de la Galaxia, y, en este siglo, hemos descubierto que la existencia de la Galaxia es una consecuencia natural del Big Bang. En todos estos casos, se han hecho retroceder las fronteras del conocimiento con el descubrimiento de nuevas leyes de la naturaleza. En cada etapa, sin embargo, había un punto en el que se podía decir: "Nuestro conocimiento científico nos ha llevado hasta aquí; más allá de este punto podemos, si queremos, postular una creación especial."

Parece que, ahora, nuestros nuevos descubrimientos de las leyes que gobiernan la naturaleza de las partículas elementales pueden permitirnos empujar las fronteras hasta la misma creación del Universo. Esto, sin embargo, no altera el hecho de que hay una frontera. Todo lo que hace es transferir nuestra atención de la forma material del Universo a las leyes que gobiernan su comportamiento. Puedo oír a un filósofo del siglo XXI diciendo: "Muy bien, estamos de acuerdo en que el Universo existe a causa de las leyes de la física. Pero, ¿quién creó esas leyes?" E incluso si, tal como han sugerido algunos

físicos, las leyes de la física que descubrimos son las únicas leyes que son coherentes entre sí de manera lógica (y por lo tanto, las únicas leyes que podrían existir), nuestro filósofo podría preguntar: "¿Quién hizo las leyes de la lógica?"

Así, mi mensaje a aquellos que creen que la ciencia está sobrepasando sus límites cuando investiga el Universo primitivo es sencillo: No hay motivo de preocupación. Por mucho que hagamos retroceder estos límites, habrá siempre espacio para la fe religiosa y para una interpretación religiosa del mundo físico.

En cuanto a mí, me siento mucho más cómodo con el concepto de un Dios lo bastante listo para idear las leyes de la física, que hacen inevitable la existencia de nuestro maravilloso Universo, que con el Dios pasado de moda que tuvo que fabricarlo todo, laboriosamente, pieza a pieza.

GLOSARIO

Aniquilación. Proceso que ocurre cuando se encuentran una partícula y su antipartícula, y sus masas se convierten en energía.

Antimateria. Forma de materia que, a nivel de las partículas, consiste en una partícula cuya masa es igual a la de una partícula normal pero que tiene carga eléctrica (y otras cargas) opuesta (véase el cap. 3).

Antiprotón. Partícula con la misma masa y el mismo spin que el protón, pero con una carga eléctrica negativa.

Año luz. Distancia que recorre la radiación electromagnética en el vacío en un año, equivale a unos 9 billones de kilómetros.

Barión. Cualquier partícula cuyos productos de desintegración incluyan un protón.

Bosón. Partícula elemental con spin entero (p. ej., spin 0, 1, 2...).

Bosón X. Partícula muy masiva de spin 1 asociada con la GUT y responsable de la desintegración del protón.

Bosones vectoriales. Partículas masivas de spin 1 cuyo intercambio genera la interacción débil.

Color. Simetría interna de los quarks. Es análoga a la carga eléctrica (pero es más difícil de imaginar).

Confinamiento. Principio que conduce a la conclusión de que los quarks tienen que estar confinados en partículas y no pueden observarse como entidades libres.

Conjugación de carga. Operación mental en la que imaginamos que reemplazamos cada partícula por su antipartícula.

Constante de acoplamiento. Número que se utiliza para especificar la intensidad de la interacción entre dos partículas.

Corrimiento hacia el rojo. Corrimiento de la luz emitida por las estrellas de las galaxias lejanas, que indica que se alejan de nosotros.

Cuerda. Objeto masivo unidimensional que puede haberse formado 10^{-35} segundos después del Big Bang y puede haber servido luego como núcleo a cuyo alrededor se condensaron las galaxias.

Deuterio. Átomo cuyo núcleo es un deuterón.

Deuterón. Núcleo constituido por un protón y un neutrón.

Edad de Hubble. Edad aproximada del Universo obtenida por extrapolación de la expansión observada al retroceder en el tiempo. El valor aceptado de la edad de Hubble es de unos 15.000 millones de años.

Efecto Doppler. Efecto por el que el movimiento de la fuente de una onda produce un corrimiento de la frecuencia de dicha onda (véase el cap. 1).

Efecto túnel (cuántico). Proceso mediante el cual las partículas cuánticas pueden atravesar barreras que serían infranqueables para los objetos clásicos.

Energía GUT. Energía a la que se unifican las fuerzas fuerte, débil y electromagnética. Normalmente se considera como 10^{15} G*e*V.

Extrañeza. Simetría interna análoga a la carga eléctrica. En la naturaleza, se observan reacciones en las que cambia la extrañeza, pero son más lentas de lo que podría esperarse.

Falso vacío. Estado en el que puede haberse encontrado el Universo poco después del Big Bang y del que escapó por efecto túnel.

Fermión. Cualquier partícula con spin semientero (p. ej., spin 1/2, 3/2, 5/2, etc.).

Fotón. Si queremos considerar que la radiación electromagnética (de las ondas radio a la luz y a los rayos X) es una partícula, damos a esta partícula el nombre de fotón.

Fuerza débil. Véase interacción débil.

Fuerza fuerte. Véase interacción fuerte.

Generación. Término que se refiere a los agrupamientos de los quarks o los leptones en tres pares, en los que cada par es una generación.

G*e*V. Gigaelectronvoltio; unidad de energía correspondiente a 10^9 veces la energía necesaria para mover un electrón a través de un voltio. La masa del protón es algo inferior a un GeV.

Gluón. Partícula sin masa de spin 1, cuyo intercambio genera la interacción fuerte entre los quarks

Gravitino. Partícula masiva de spin 3/2 cuyo intercambio contribuye a la fuerza de gravedad en algunas teorías de supersimetría.

Gravitón. Partícula sin masa de spin 2 cuyo intercambio se cree que produce la fuerza gravitatoria.

GUT. Siglas de la teoría de la gran unificación (del inglés. Grand Unified Theory).

Hadrón. Cualquier partícula que participa en la interacción fuerte.

Inflación. Proceso por el que el Universo se expandió con mucha rapidez unos 10 segundos después del Big Bang.

Interacción débil. Fuerza que gobierna la desintegración radiactiva ordinaria. Llamase también fuerza débil.

Interacción fuerte. Fuerza responsable de mantener juntas las partículas en el núcleo o los quarks en la partícula. Llamase también fuerza fuerte.

Inversión temporal. Operación mental en la que imaginamos ver una interacción dada producirse hacia atrás en el tiempo.

Ion. Átomo del que se han arrancado electrones.

Ionización. Proceso por el que se arrancan electrones de átomos antes neutros.

Isótropo. Una cantidad es isótropa si no varía al observarla desde cualquier dirección. La radiación de microondas es aproximadamente isótropa (véase el cap. 1).

Lambda. Barión con spin 1/2 y extrañeza –1. Fue la primera partícula extraña descubierta.

Libertad asintótica. Propiedad que permite a los quarks interaccionar libremente cuando están ligados dentro de las partículas.

Límite de Parker. Límite en el número de monopolos magnéticos de la galaxia, que se funda en la existencia del campo magnético galáctico.

Leptón. Partícula que no participa en la interacción fuerte. Los leptones son seis, el electrón, el muon, el tau y el neutrino asociado con cada una de estas partículas.

Ley de conservación. Ley que establece que una determinada cantidad no cambia (se conserva) en un proceso físico dado.

Masa GUT. Véase energía GUT.

Mesón. Cualquier partícula cuyos productos de desintegración no incluyen ningún protón.

Mesón mu o muon. Leptón similar al electrón en todos los aspectos, excepto en que tiene una masa unas 200 veces mayor.

Mesón pi o pión. Familia de tres mesones (masa de 0,14 G*e*V) que participan en las interacciones fuertes.

Mesón tau. Tercer leptón masivo, idéntico al electrón y al muon excepto por su gran masa.

Microondas. Ondas electromagnéticas similares en todos los aspectos a la luz visible, excepto en que tienen una longitud de onda más larga.

Modelo de Weinberg-Salam; modelo de Weinberg-Glashow-Salam. Teoría original que unificó las fuerzas débil y electromagnética.

Monopolo magnético. Partícula de gran masa que se formó 10^{-35} segundos después del Big Bang y que es portadora de un solo polo magnético, norte o sur.

Muon. Véase mesón mu.

Neutrino. Leptón sin masa, de spin 1/2, emitido con frecuencia en la desintegración de partículas.

Neutrón. Partícula masiva pero sin carga eléctrica. Tiene aproximadamente la misma masa que el protón y se encuentra normalmente en el núcleo.

Nucleosíntesis. Proceso por el que se forman los núcleos a partir de protones y neutrones.

Nuevo modelo inflacionario. Versión de las teorías inflacionarias en la que sólo aparece un dominio en la congelación GUT.

Número cuántico. Conjunto de números que especifica la identidad de una partícula, por ejemplo, spin, carga eléctrica, extrañeza.

Paridad. Propiedad de los sistemas físicos que nos indica si son idénticos cuando se observan como en un espejo.

Partículas fósiles. Partículas (como los monopolos magnéticos y los quarks) que no desaparecieron en seguida del Big Bang.

Partícula virtual. Partícula creada y reabsorbida en un tiempo tan corto que no se pueden detectar las violaciones de la conservación de la energía asociadas con su masa.

Pión. Véase mesón pi.

Plasma. Conjunto de cargas positivas y negativas que son libres de moverse con independencia unas de otras; formado normalmente por arrancamiento de electrones de sus núcleos.

Positrón. Antipartícula del electrón. Tiene la misma masa que el electrón pero una carga eléctrica positiva.

Principio de incertidumbre. Principio de la mecánica cuántica que establece que la incertidumbre en la energía de un sistema multiplicada por la incertidumbre en el tiempo durante el que el sistema ha tenido esa energía debe ser mayor que un número específico.

Problema del horizonte. Problema asociado con el hecho de que la radiación procedente de direcciones diferentes del Universo es isótropa, aunque las regiones desde donde se emite podrían no haberse comunicado entre sí.

Problema del Universo plano. Problema asociado con el hecho de que hay en el Universo casi exactamente la materia suficiente para cerrarlo.

Protón. Partícula masiva con una carga eléctrica positiva. Uno de los bloques constituyentes del núcleo.

Renormalización. Proceso por el que se eliminan los infinitos aparentes que surgen en los cálculos de interacciones entre partículas.

Rotura espontánea de la simetría. Proceso por el que una simetría que existe a alta temperatura desaparece del sistema al disminuir la temperatura.

Simetría gauge. Simetría válida cuando ninguna cantidad mensurable depende de las definiciones hechas por observadores distintos.

Simetría interna. Propiedades de las partículas elementales tales como la carga eléctrica, la extrañeza, el encanto, el color, etc..., que caracterizan la estructura y el comportamiento de la partícula.

Simetría local. Simetría en la que ninguna cantidad mensurable depende de la definición de una cantidad determinada y en la que todo observador puede hacer su definición de manera independiente de los demás.

Simetrías globales. Simetría en la que ninguna cantidad mensurable depende de la definición de una cantidad determinada, pero en la que todos los observadores deben usar la misma definición.

Superconductores. Materiales que, a temperaturas muy bajas, conducen la electricidad sin ninguna pérdida.

Supergravedad. Clase de teorías gauge de la gravedad.

Superpartícula. Tipo único de partícula que existía antes del tiempo de Planck.

Supersimetría. Simetría en la que los bosones y los fermiones son intercambiables.

Teorema CPT. Teorema que establece que todas las leyes de la naturaleza deben ser las mismas si reemplazamos las partículas por antipartículas, si observamos a través de un espejo y si pasamos la película hacia atrás.

Teoría de la gran unificación. Teoría en la que las fuerzas fuerte, débil y electromagnética se consideran idénticas.

Teoría del campo unificado. Cualquier teoría en la que dos interacciones aparentemente distintas se consideran idénticas a un nivel más profundo.

Teoría gauge. Cualquier teoría que tenga simetría gauge.

Tiempo de Planck. Período de 10^{-41} segundos después del Big Bang. Para escalas de tiempo más cortas que ésta, debe incluirse los efectos de la gravedad en todos los procesos físicos.



Pocas cuestiones golpean con más fuerza la mente humana que aquellas que se refieren a la creación del Universo y, desde los descubrimientos de los años veinte, ha sido un objetivo fundamental de los físicos y de los astrónomos la reconstrucción de la historia del Universo desde "donde todo tiene su origen": el momento de la creación o Big Bang.
El profesor James S. Trefil explica en este libro cómo los miles de millones de galaxias experimentan una expansión general y cómo invirtiendo el sentido de esa expansión podemos reconstruir la historia estableciendo las "edades del Universo".
El autor contempla también otros aspectos interesantes: la búsqueda de partículas residuales, las soluciones a los problemas de la antimateria, la formación de las galaxias, de dónde venimos, a dónde vamos y, en definitiva, cuál será el sentido del Universo.

James S. Trefil es autor de libros de texto de física y de más de cien artículos, que han aparecido tanto en revistas especializadas como en revistas populares, tales como *Smithsonian*, *Science Digest*, *Saturday Review* y *Popular Science*. Autor también de *From Atoms to quarks* y *The unexpected vista (El panorama inesperado)*, publicado en la Biblioteca Científica Salvat.